

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Bruno Bartolec**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor

Izv.prof.dr.sc Dražen Lončar

Student

Bartolec Bruno

Zagreb, 2015.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se obitelji na podršci, mentoru prof. Draženu Lončaru na stručnom vodstvu te mag. ing. Kristijanu Štefanecu na ustupanju potrebnih podataka za izradu ovog rada*

Bruno Barotlec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: <b>26-02-2015</b>	Prilog
Klasa: <b>602-04/15-613</b>	
Ur.broj: <b>15-1703-15-85</b>	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno BARTOLEC**

Mat. br.: 0035185172

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OPTIMIZACIJA RAZVODA PROCESNE PARE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **PROCESS STEAM DISTRIBUTION OPTIMISATION**

Opis zadatka:

U postrojenju prehrambene industrije procijenjeni toplinski gubici razvoda procesne pare uzrokovani oštećenjem izolacijskog materijala premašuju 20 %. U sklopu pripreme projekta rekonstrukcije parovoda provest će se analiza utjecaja debljine izolacije i parametara pare na visinu toplinskih gubitaka.

U okviru rada potrebno je:

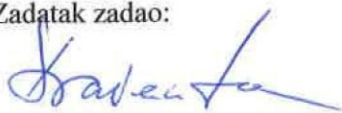
1. Izvesti matematički model dinamike termohidrauličkih procesa u parovodu duljine 200 m za dva promjera DN 100 i DN 150;
2. Simulacijom matematičkog modela odrediti toplinske gubitke u uvjetima maksimalne i minimalne potrošnje procesne pare za zimski i ljetni dan;
3. Analizirati utjecaj snižavanja nazivnih parametara procesne pare (10 bar, 180 °C) na visinu toplinskih gubitaka;
4. Provedbom tehno-ekonomske analize odrediti debljinu izolacije za koju će jednostavni period povrata ulaganja biti najkraći;

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Dražen Lončar


Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## Sadržaj

Popis slika .....	II
Popis tablica .....	III
Popis oznaka.....	IV
Sažetak .....	VI
Summary .....	VII
1. Uvod .....	1
2. Upotreba pare u prehrambenoj industriji .....	3
2.1 Sušenje .....	4
2.2 Termička sterilizacija .....	4
2.2.1 Autoklav.....	6
2.3 Uparavanje .....	8
2.4 Korištenje pare za grijanje i zagrijavanje potrošne tople vode .....	12
3. Matematički model.....	13
3.1 Model procesa u parovodu .....	13
3.2 Toplinski tok .....	15
3.2.1 Provođenje topline .....	16
3.2.2 Prijelaz topline .....	19
4. Optimiziranje parovoda.....	22
4.1 Postojeće stanje parovoda .....	22
4.2 Sniženje parametara svježje pare na ulazu .....	26
4.2 Izolacija .....	27
5. Zaključak.....	33
Literatura .....	34
Prilozi .....	35
Prilog I : Programski kod .....	36
Prilog II: Prikaz odabranih međurezultata po segmentima .....	39

## Popis slika

Slika 1. Potrošnja finalne energije po sektorima u članicama EU za 2012. [2] .....	1
Slika 2. Upotreba procesne pare po industrijskim sektorima u SAD-u [3] .....	2
Slika 3. Proizvodnja i potrošnja pare u prehrambenoj industriji .....	3
Slika 4. Tunelski pasterizator[4] .....	5
Slika 5. Normalni autoklav[4] .....	6
Slika 6. Normalni autoklav s hlađenjem pod tlakom[4] .....	7
Slika 7. Centrifugalni isparivač[4] .....	9
Slika 8. Cijevni isparivač s prisilnom cirkulacijom[4] .....	10
Slika 9. Dvostupanjska isparna stanica s pločastim izmjenjivačem topline[4] .....	11
Slika 10. Postrojenje za uparavanje voćnog soka i rekuperaciju arome[4] .....	11
Slika 11. Podjela parovoda na segmente .....	14
Slika 12. Mehanizmi izmjene topline .....	16
Slika 13. Jednoslojna stijenka i izotermni rubni uvjeti .....	17
Slika 14. Provođenje kroz stijenku cijevi i izolaciju .....	18
Slika 15. Veličine relevantne za iznos toplinskog toka .....	21
Slika 16. Gubitak topline po mjesecima .....	24
Slika 17. a) b) c) d) Termografska snimka parovoda .....	25
Slika 18. Ovisnost toplinskog toka o radnom tlaku .....	26
Slika 19. a) b) c) d) Promjena toplinskog toka s debljinom izolacije .....	29
Slika 20. Gubitak topline po mjesecima za cijev izoliranu izolacijom A debljine 20 mm .....	32

## Popis tablica

Tablica 1. Konstante u izrazu za koeficijent prijelaza topline pri kondenzaciji.....	19
Tablica 2. Toplinski tok za promjer cijevi DN100.....	23
Tablica 3. Toplinski tok za promjer cijevi DN150.....	23
Tablica 4. Mjesečna potrošnja pare .....	23
Tablica 5. Debljine, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju A .....	28
Tablica 6. Debljina, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju B .....	28
Tablica 7. Debljina, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju C .....	28
Tablica 8. Debljina, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju D .....	28
Tablica 9. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju A .....	31
Tablica 10. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju B .....	31
Tablica 11. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju C .....	31
Tablica 12. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju D .....	31

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$L$	m	duljina cijevi
$r$	m	radijus cijevi
$r_1$	m	radijus unutarnjeg promjera cijevi
$d_1$	m	unutarnji promjer cijevi
$r_2$	m	radijus vanjskog promjera cijevi
$r_3$	m	radijus vanjskog promjera izolacije
$\delta_i$	m	debljina izolacije
$A$	m <sup>2</sup>	površina oplošja cijevi
$t$	s	vrijeme
$t_{uk}$	s	godišnje vrijeme strujanja pare u parovodu
$m''$	kg	masa suhozasićene pare
$m'$	kg	masa vrele kapljevine
$M$	kg	masa pare
$\Delta M$	kg	masa pare koja godišnje kondenzira zbog toplinskih gubitaka
$M_{uk}$	kg	ukupna masa pare koja prođe kroz parovod
$\dot{m}$	kg/s	maseni tok pare
$\dot{m}_{max}$	kg/s	maksimalni maseni protok pare
$\dot{m}_{min}$	kg/s	minimalni maseni protok pare
$G$	kg/m <sup>2</sup> s	masenifluks
$G_{eq}$	kg/m <sup>2</sup> s	ekvivalentni masenifluks
$\rho'$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća vrele kapljevine
$\rho''$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća suhozasićene pare
$T_{zas}$	K	Temperatura zasićenja vodene pare
$T_v$	°C	Temperatura vanjskog zraka
$T$	K	temperatura
$T_{s1}$	K	temperatura stijenke na unutarnjem promjeru cijevi
$T_{s2}$	K	temperatura stijenke na vanjskom promjeru cijevi
$T_{s3}$	K	temperatura stijenke na vanjskom promjeru izolacije
$h$	J/kg	specifična entalpija
$h''$	J/kg	specifična entalpija suhozasićene pare
$h'$	J/kg	specifična entalpija vrele kapljevine
$q$	W/m <sup>2</sup>	gustoća toplinskog toka
$\phi$	W	toplinski tok



$Q_{uk}$	J	ukupni godišnji toplinski gubitak
$x$		sadržaj pare
$n$		broj segmenta
$\lambda$	W/mK	toplinska provodnost
$\lambda_c$	W/mK	toplinska provodnost cijevi
$\lambda_i$	W/mK	toplinska provodnost izolacije
$\lambda'$	W/mK	toplinska provodnost vrele kapljevine
$\lambda_z$	W/mK	toplinska provodnost zraka
$\alpha$	W/m <sup>2</sup>	koeficijent prijelaza topline
$\alpha_1$	W/m <sup>2</sup>	koeficijent prijelaza topline s pare na stijenku cijevi
$\alpha_2$	W/m <sup>2</sup>	koeficijent prijelaza topline s stijenke cijevi/izolacije na zrak
$Re_z$		Reynoldsov broj za zrak
$Re_{eq}$		Ekvivalentni Reynoldsov
$Pr'$		Prandtl broj za vrelu kapljevinu
$Pr_z$		Prandtlov broj za zrak
$\mu'$	Pa*s	dinamička viskoznost vrele kapljevine
$P$	kn	novčani gubici zbog kondenziranja pare
$I$	kn	cijena izolacije za cijev
$Y$	kn/m	cijena izolacije po metru

## **Sažetak**

U radu su analizirane metode smanjenja toplinskih gubitaka u razvodu procesne pare. Kako bi mogli odrediti učinkovitost primijenjene metode izveden je matematički model strujanja pare u cijevi, pomoću kojega se može izračunati toplinski tok koji od pare odlazi prema okolini. Izvedeni matematički model primijenjen je za ocjenu učinkovitosti smanjenja toplinskih gubitaka na dvije različite metode. Prva je smanjenje ulaznih parametara pare dok je druga instalacija izolacije. Za izolaciju je također provedena tehno-ekonomska analiza za različite debljine.

Ključne riječi: procesna para, matematički model, toplinski tok

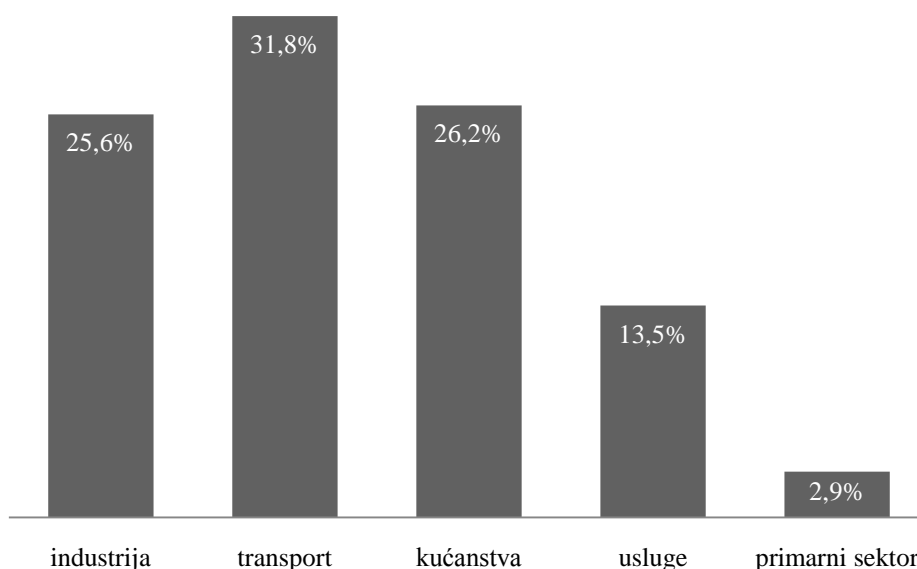
## **Summary**

This work analyses methods of reducing heat loss during the transport of process steam. To determine the efficiency of an applied method, a mathematical model of steam flow in a horizontal pipe was developed to help determine the heat flow from the steam to the environment. The developed mathematical model is applied to evaluate the efficiency of heat loss reduction of two different methods. The first is a reduction of inlet steam parameters and the second is the application of thermal insulation. Also, a financial analysis is performed for different insulation thicknesses to see which thickness is most financially viable

Keywords: process steam, mathematical model, heat flow

## 1. Uvod

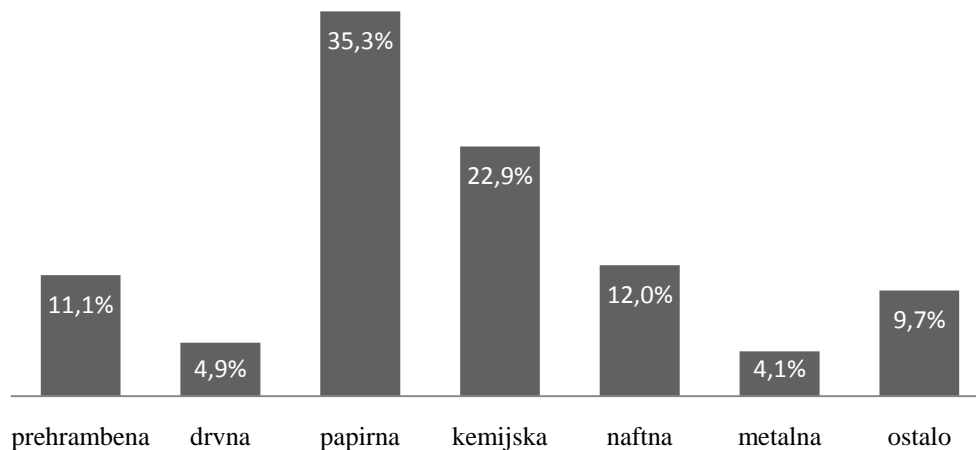
Čovjek koristi toplinsku energiju od prapovijesti kako bi oblikovao svijet oko sebe prema svojim potrebama. Toplina je pokretač mnogih procesa od velike važnosti modernoj ljudskoj civilizaciji. I u današnje doba glavni izvor toplinske energije je kemijska energija sadržana u fosilnim gorivima. Tijekom 20. stoljeća čovječanstvo je došlo do spoznaje da uporaba fosilnih goriva znatno utječe na stanje planete[1]. Ogromna potrebe za energijom koju čovječanstvo ima mogla bi imati i negativne ishode. Mogućnost negativnih posljedica uporabe fosilnih goriva čovječanstvu je dalo poticaj da svoje potrebe za energijom snabdijeva iz drugih izvora. Također se podigla svijest o učinkovitosti uporabe energije. Čovjek više ne raspolaže olako energijom već pokušava smanjiti gubitke na svim mogućim mjestima.



Slika 1. Potrošnja finalne energije po sektorima u članicama EU za 2012. [2]

Industrija troši približno trećinu svjetske energije. Toplinska energija je pokretač mnogih industrijskih procesa. U velikom broju industrijskih pogona toplinska energija se proizvodi centralizirano. Toplinska energija se izgaranjem fosilnog goriva oslobađa na jednom mjestu te ju je potrebno dovesti do mjesta gdje je ona potrebna za neki proces. Jedan od češće upotrebljivanih medija za prijenos toplinske energije je vodena para. Napori za smanjenje gubitaka energije ne smiju zaobići transport toplinske energije jer time narušavamo efikasnost cijelog postrojenja.

Vodena para se za prijenos toplinske energije koristi od doba Rimljana. U današnjim industrijskim postrojenjima osim za prijenos topline koristi se i za druge svrhe, u različitim sektorima industrije kao procesna para. U naftnoj industriji se koristi u procesu krekiranja kako bi iz teških ugljikovodika dobili one lakše. Koristi se za procese sušenja i koncentriranja kao i za proces destilacije određenih sastojaka iz složenih sirovina.



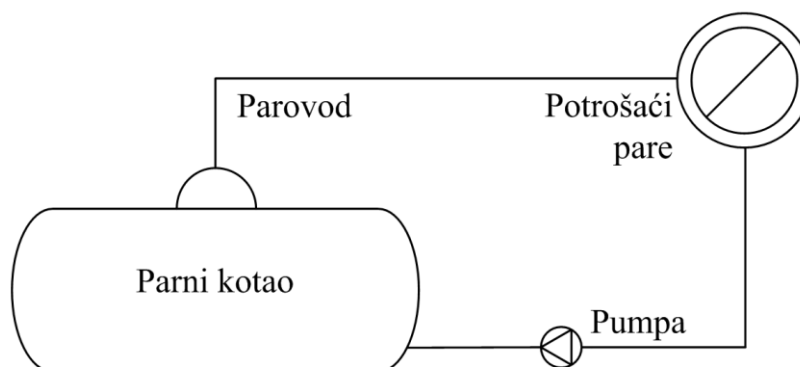
Slika 2. Upotreba procesne pare po industrijskim sektorima u SAD-u [3]

U ovom radu provest ćemo analizu toplinskih gubitaka na dijelu razvoda pare u postrojenju prehrambene industrije. Za postojeće stanje se smatra da ima značajne toplinske gubitke te je potrebno ustvrditi koji je najbolji način za poboljšanje stanja odnosno smanjenja toplinskih gubitaka.

## 2. Upotreba pare u prehrambenoj industriji

U prehrambenoj industriji para se najčešće koristi kao izvor topline za različite procese obrade prehrambenih proizvoda i pri sterilizaciji namirnica i posuda. Dobra termodinamička svojstva čine vodenu paru odličnim medijem za prijenos topline, odnosno kao izvor topline za procese u prehrambenoj industriji. Također voda je relativno dostupna i jeftina u odnosu na ostale tvari, a također nije štetna za ljudsko zdravlje pa je stoga odlična za primjenu u prehrambenoj industriji.

Vodena para se najčešće proizvodi na lokaciji odvojenoj od postrojenja gdje se odvija obrada prehrambenih proizvoda i ambalaže, u kotlovnici. U nekim granama industrije, kao što su šećerane, uljare, gdje je potreba za parom velika moguća je upotreba parnih turbina. Para se proizvodi na tlaku većem nego što je potreban za prehrambene procese te se u parnoj turbini iskorištava ta veća razina tlaka za proizvodnju električne energije ekspanzijom pare. Za tu svrhu se koriste protutlačne turbine. Opskrba električnom energijom iz vlastitih parnih turbina daje samostalnost pogonu. Vodena para se dobiva u kotlovima iskorištavanjem kemijske energije goriva. Prema radnom tlaku kotlove u prehrambenoj industriji dijelimo na niskotlačne, radni tlak do deset bara, srednjetačne koji su na rade na tlakovima od deset do petnaest bara te visokotlačne kotlove čiji radni tlak može doseći vrijednosti do šezdeset bara. Nakon što smo proizveli paru potrebno ju je razvesti do potrošača. U potrošačima para kondenzira i u stanju kapljevine se vraća u kotao. Voda se nalazi u zatvorenom krugu i uz naknadu gubitaka se konstantno koristi.



Slika 3. Proizvodnja i potrošnja pare u prehrambenoj industriji

Procesi obrade prehrambenih proizvoda u kojima se najčešće koristi vodena para su sušenje, konzerviranje termičkom sterilizacijom te uparivanje.

## 2.1 Sušenje

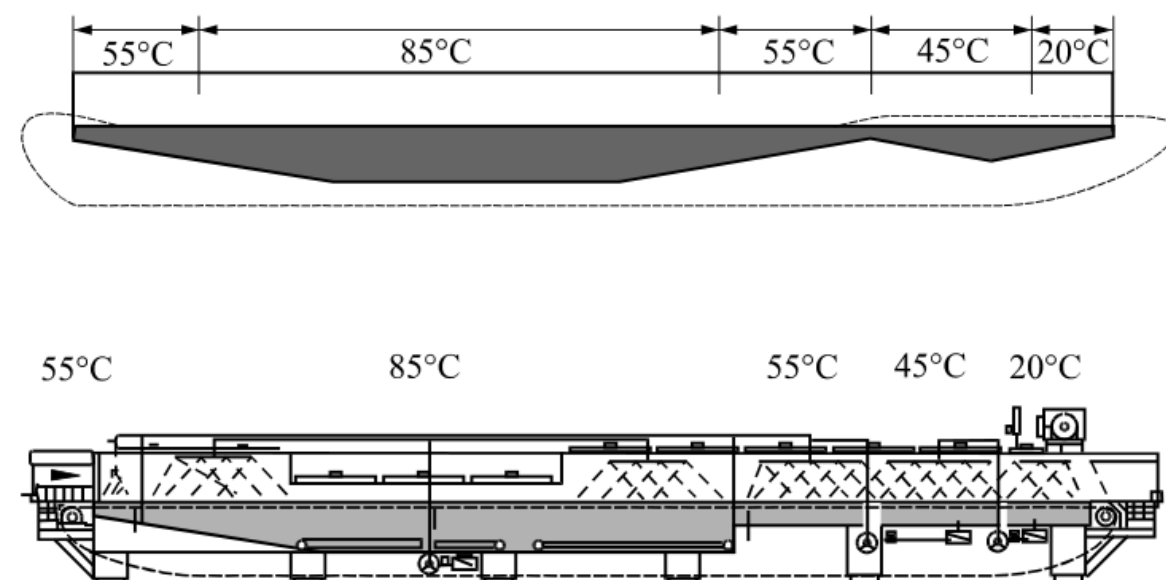
Sušenje je jedan od najstarijih postupaka konzerviranja hrane. Prvenstveno se suše žitarice, ali moguće je sušiti voće i meso. Konzerviranje sušenjem se bazira na smanjenju udjela vode u proizvodu na razinu ispod razine dovoljne za aktivnost mikroorganizama. Često se hrana suši ne samo da se spriječi kvarenje zbog djelovanja mikroorganizama već i kvarenje drugim promjenama, kao što su na primjer kemijske promjene. Sušenjem se postižu i drugi važni efekti kao što je smanjenje mase hrane, a često i volumena hrane. Sušenjem se iz hrane uklanja i hidratna i konstitucijska voda pa nastaju velike promjene, smanjenje moći rehidracije, posmeđivanje koje ne nastaje djelovanjem enzima, gubitkom nekih važnih sastojaka. Sposobnost rehidracije je jedan od važnijih kriterija za ocjenjivanje uspješnosti procesa sušenja odnosno dehidracije. Praćenjem porasta težine kuhanjem dehidratirane hrane mjere se tok i doseg rehidracije. Za kakvoću mnogih prehrambenih proizvoda od primarnog značaja je prisutnost hlapivih sastojaka. Za vrijeme sušenja se te tvari u najvećoj mjeri gube. Sve vrste prehrambenih proizvoda prije podvrgavanja procesu sušenja zahtijevaju određenu tehnološku pripremu. Procesi prije sušenja uključuju procese općeg karaktera kao što su pranje, kalibriranje, ljuštenje, rezanje, usitnjavanje i tako dalje te procese specifične za sušenje kao što su blanširanje, sumporenje, sulfitiranje i dipovanje. Zbog velike raznolikosti sustava i svojstava hrane postoje brojni tipovi postrojenja za sušenje više ili manje prilagođeni dehidraciji pojedine vrste hrane. Para u postrojenjima za sušenje služi kao izvor topline za zagrijavanje zraka, najčešće u takozvanim adijabatskim sušnicama.[4]

## 2.2 Termička sterilizacija

Cilj termičke sterilizacije je uništenje mikroorganizama te inaktiviranje enzima koji su pod normalnim uvjetima sposobni da izazovu kvarenje namirnica. Da bi sterilizirali proizvod moramo ga zagrijati na temperaturu višu od letalne temperature mikroorganizama. Letalna temperatura se obično nalazi oko 120°C. Letalni uvjeti nekog mikroorganizma ne mogu biti izraženi samo temperaturom već i vremenom toplinske smrti. Proces sterilizacije može se izvesti na tri različita načina. Prvo, možemo ga izvesti prije punjenja i zatvaranja u ambalažu.

Drugo, proces možemo izvesti nakon punjenja i zatvaranja proizvoda dok je treća opcija da proces sterilizacije djelomično izvedemo prije, a djelomično poslije punjenja i zatvaranja proizvoda u ambalažu. Izbor načina sterilizacije ovisi o svojstvima proizvoda te o vrsti ambalaže u koju se proizvod pakira. Tekući, polutekući i kašasti proizvodi se u pravilu steriliziraju prije pakiranja i zatvaranja dok se kruti proizvodi steriliziraju nakon zatvaranja ambalaže. Aseptički postupci su oni kod kojih se namirnica najprije sterilizira, a zatim ohladi prije pakiranja te se hladna pakira u sterilnu ambalažu u aseptičkim uvjetima. Ovakvim postupkom sterilizacije izbjegavamo degradativne promjene koje se javljaju kod sporog ohlađivanja namirnica u ambalaži. Sterilizacija, odnosno pasterizacija namirnica u hermetičkoj ambalaži provodi se u uređajima kontinuiranog ili diskontinuiranog tipa pod atmosferskim ili povećanim tlakom.

Najjednostavniji uređaj pod atmosferskim tlakom je vodena kupelj direktno ili indirektno grijana vodenom parom. Za veće kapacitete koriste se kontinuirani uređaji koji u jednom protoku vrše sterilizaciju i hlađenje. Među ove uređaje spada tunelski pasterizator u kojemu se grijanje vrši upuštanjem zasićene vodene pare preko proizvoda koji se kreće pomoću žičanog transportera.[4]



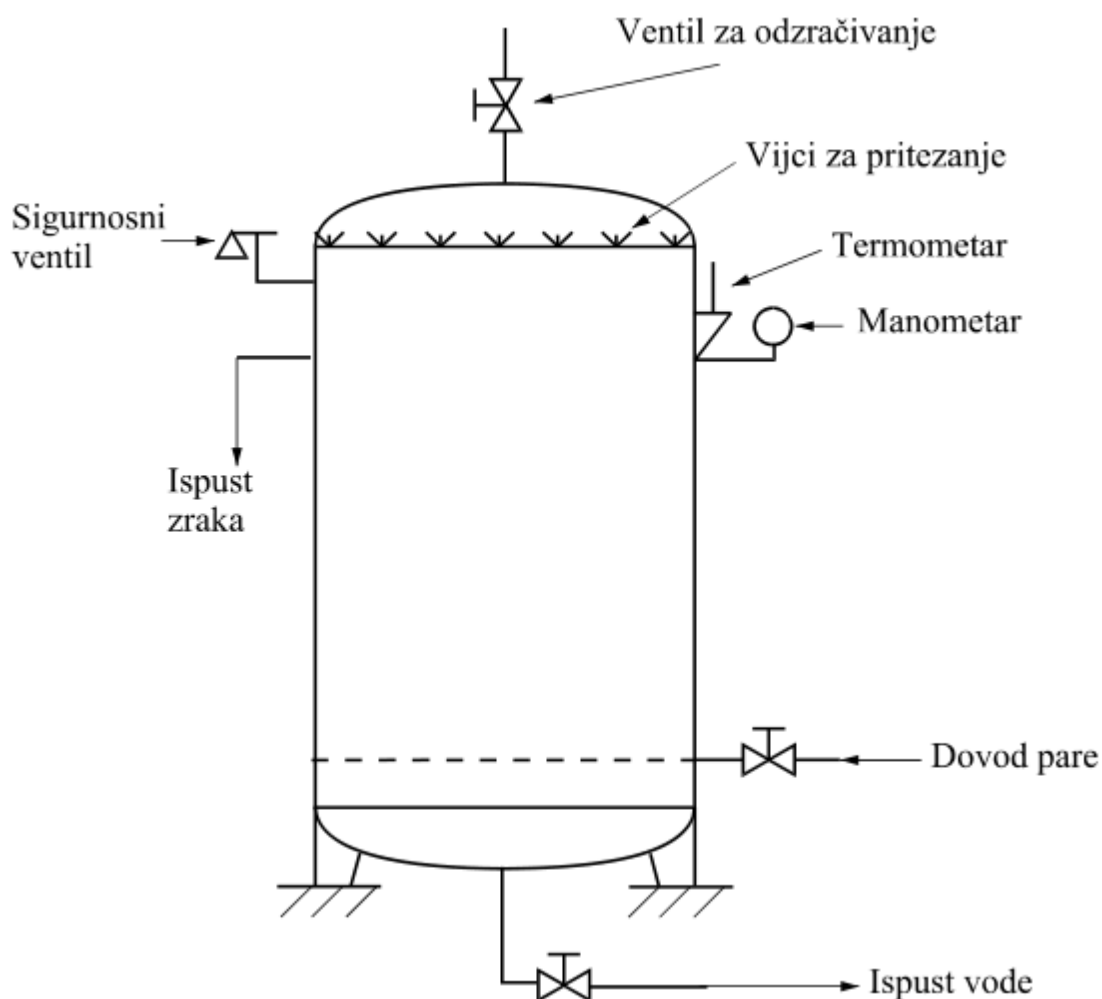
Slika 4. Tunelski pasterizator[4]



### 2.2.1 Autoklav

Autoklavima se obavlja sterilizaciju proizvoda na temperaturama iznad 100°C. Prema tipu, autoklavi se dijele na normalne autoklave, tlačne i pretlačne autoklave, a prema izvedbi na vertikalne i horizontalne. Sterilizaciju u autoklavima možemo vršiti u vodenoj kupelji ili vodenoj pari. Sterilizacija u vodenoj pari je ekonomičnija sa stajališta utroška topline.

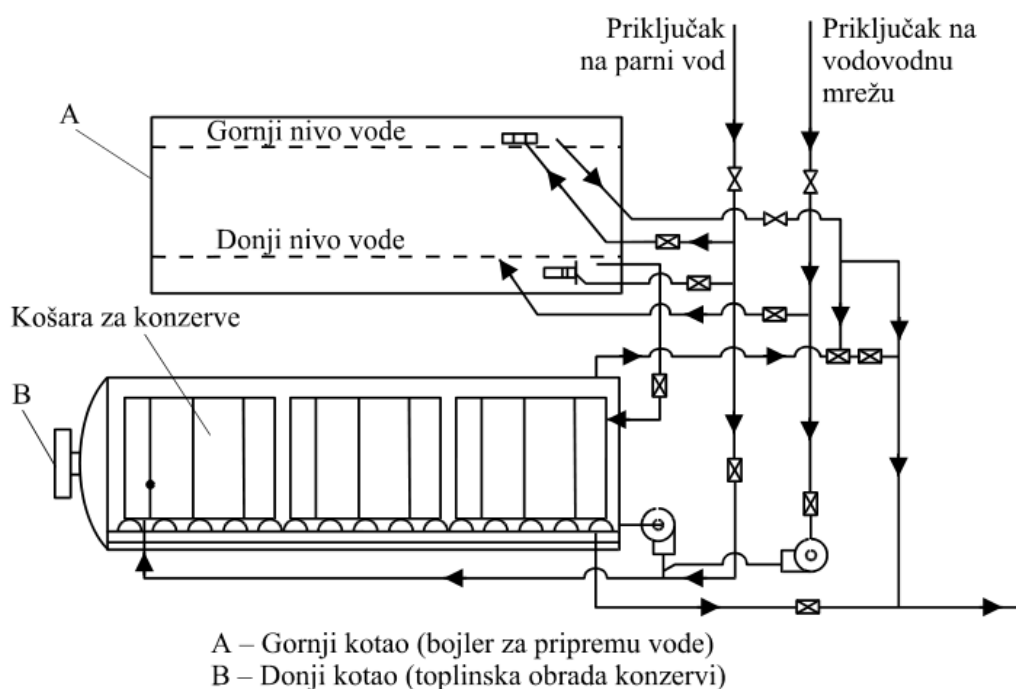
Normalni autoklav izveden je za maksimalni radni tlak od 1,5 bara, zatvara se poklopcem koji se pričvršćuje krilnim maticama i vijcima dok se brtvljenje vrši pomoću gumenog prstena. Od armature normalni autoklav ima dovod pare, vod za odzračivanje, sigurnosni ventil i pipac za odzračivanje koji se nalaze na poklopcu dok se na dnu autoklava nalazi odvodni vod za kondenzat. Na jednoj strani normalnog autoklava nalaze se manometar i termometar.[4]



Slika 5. Normalni autoklav[4]

Steriliziranje se u normalnom autoklavu izvodi se na sljedeći način. Normalni autoklav je djelomično napunjen vodom te je u njega stavljena košara s limenkama. Razina vode je dovoljno visoka da su gornje limenke tek djelomično uronjene. Poklopac zatvorimo, pritegnemo i zabrtvimo gumenim prstenom te otvorimo dovod pare uz otvoreni ventil za odzračivanje. Nakon što parom istjeramo zrak iz autoklava zatvorimo ventil za odzračivanje. Pipac za odzračivanje ostaje otvoren i kroz njega izlazi vodena para. Pustimo da u autoklavu temperatura i tlak porastu do željenih vrijednosti i nakon toga podesimo protok pare tako da željene vrijednosti ostanu konstantne. Konstantne vrijednosti temperature i tlaka držimo propisano vrijeme, a nakon toga zatvaramo dovod pare u potpunosti. Ventil za odzračivanje polako otvaramo tako da postepeno smanjujemo tlak kako ne bi oštetili limenke. Kada se tlak spusti na atmosferski otvaramo autoklav i košaru s limenkama vodimo na hlađenje.

Normalni autoklav jednostavno možemo preurediti tako da može obavljati proces hlađenja pod tlakom. Dodavanjem mogućnosti hlađenja autoklavu bitno pojednostavljujemo proces sterilizacije te on postaje pogodniji za istovremeno sterilizaciju većeg broja limenki. Nakon što smo limenke dovoljno vremena zadržali na propisanoj temperaturi ne otvaramo ventile da bi snizili tlak već dovodimo hladnu vodu u autoklav. Kada hidraulički tlak dovoljno poraste otvara se tlačni ventil i vruća voda izlazi iz autoklava. Nakon što dovoljno ohladimo limenke spuštamo tlak u autoklavu i daljnje hlađenje vršimo bez pretlaka.[4]

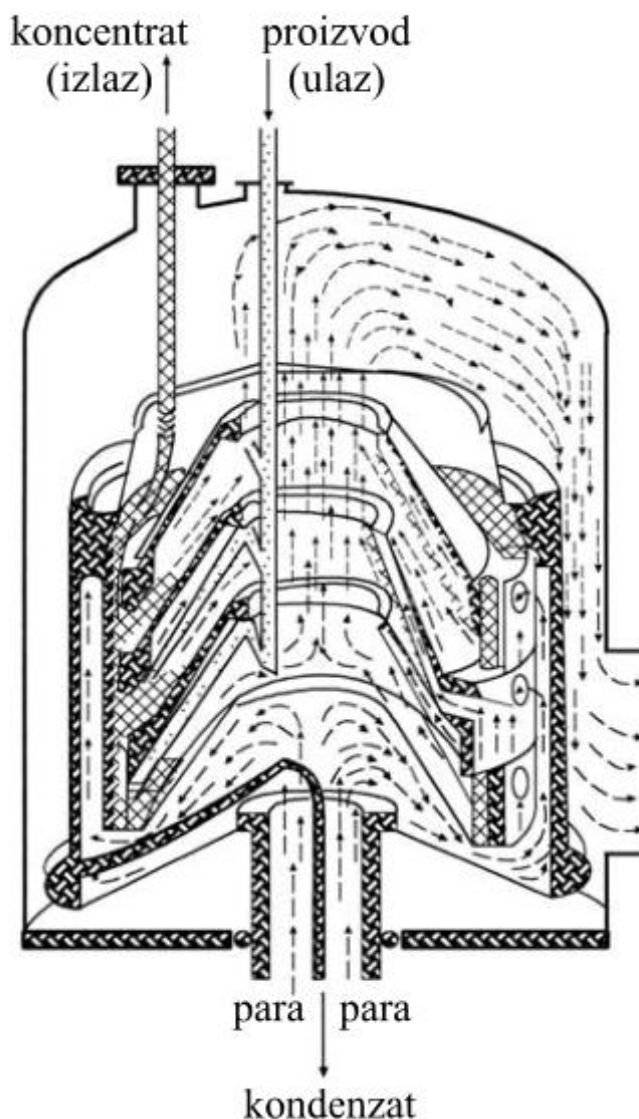


Slika 6. Normalni autoklav s hlađenjem pod tlakom[4]

## 2.3 Uparavanje

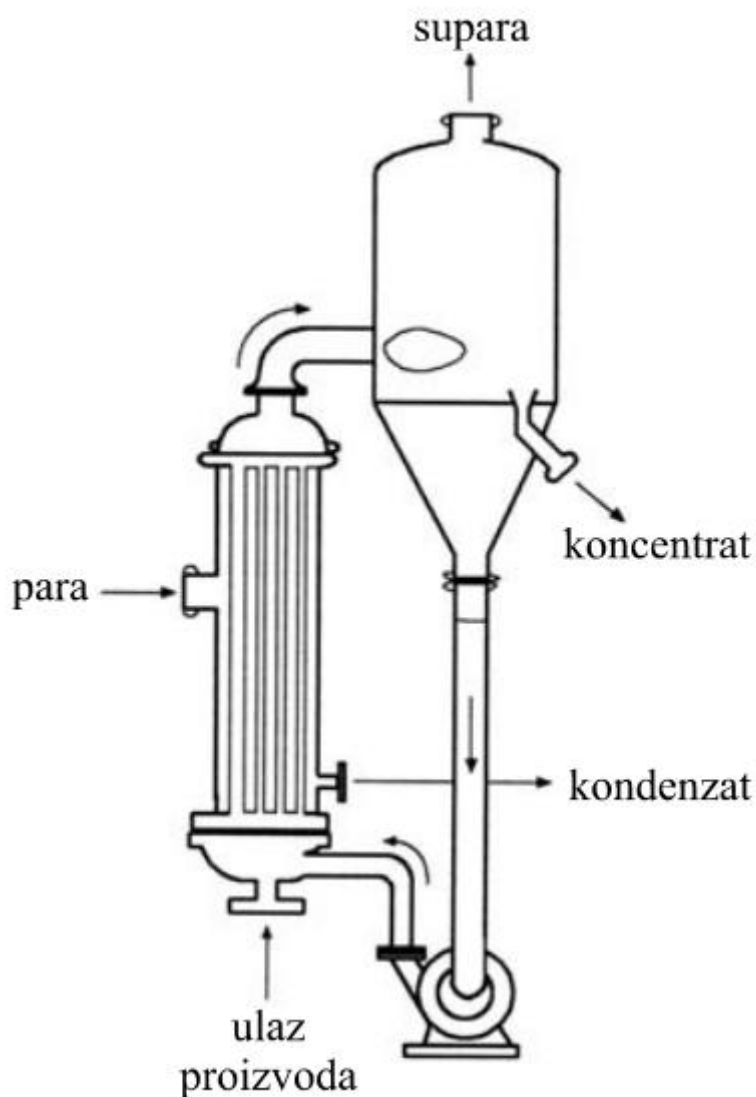
Uparavanje spada u skupinu procesa konzerviranja hrane koncentriranjem. Kod procesa koncentriranja uklanjamo vodu tekuće hrane molekularnim i vrtložnim procesima. Procesi u kojima se uklanja voda nazivaju se procesima dehidracije, a uz koncentriranje proces sušenja također spada u procese dehidracije. Sušenjem se udio vode u proizvodu znatno više smanjuje nego nakon koncentriranja. Proces koncentriranja nesmiye izazvati degradaciju različitih osjetljivih sastojaka u proizvodu te mora iz proizvoda ukloniti samo vodu dok se ostali sastojci moraju zadržati. Kod uparavanja voda se izdvaja isparavanjem. Uparavanje je najčešće primijenjena vrsta koncentriranja iako postoji niz problema koji se pojavljuju prilikom procesa. Najznačajniji nedostatak je gubitak tvari arome koje odlaze sa suparom. Supara je para koja nastaje prilikom uparavanja. Aromu možemo očuvati rekuperacijom iz supare, rektifikacijom i apsorpcijom te vraćanjem u koncentrat. Čak i kod primjene uređaja za rekuperaciju postoje komponente arome koje ne možemo vratiti. Razlog tomu je što su one vrlo hlapljive ili imaju vrelište jednako ili više od vode. Prilikom uparavanja dolazi do različitih termičkih degenerativnih reakcija pri namirnicama koje su osjetljive na visoke temperature kao što su na primjer voćni sokovi. Zbog toga pokušavamo proces uparavanja ostvariti na što nižim temperaturama u što kraćem vremenu.

Svako isparno postrojenje sastoji se od jednog izmjenjivača topline, odjeljivača pare i tekućine, kondenzatora supare. Grijanje namirnica se provodi vodenom parom u isparivačima. Kako u isparivačima želimo proizvod zagrijati u što kraćem vremenu stijenke izmjenjivača nastojimo izvesti što tanjima kako bi toplinski tok od pare prema namirnici bio što veći. Para u isparivaču najčešće kondenzira filmskom kondenzacijom. Kod filmske kondenzacije para ima znatno manji koeficijent prijelaza topline nego kod kapljičaste kondenzacije. U centrifugalnim isparivačima dolazi do kapljičaste kondenzacije. Prijelaz topline sa stijenke na proizvod uvelikoj mjeri ovisi njegovoj viskoznosti. Povećanjem viskoznosti, koje je posljedica smanjenja sadržaja vode, smanjuje se brzina strujanja i povećava film tekućine na stijenkama što smanjuje koeficijent prijelaza topline. Kod centrifugalnih isparivača ovaj efekt nije toliko izražen zbog djelovanja centrifugalnih sila i zbog povećanja brzine udaljavanjem od središta rotacije. Smanjenje koeficijenta prijelaza topline sa stijenke na namirnice također možemo smanjiti primjenom mehaničkih sredstava, takozvanim forsiranim filmom.[4]



Slika 7. Centrifugalni isparivač[4]

Kako bi postigli veću toplinsku efikasnost isparivača možemo ih izvesti u više stupnjeva. Kod jednostupanjskih isparivačkih stanica para se koristi samo jednom za proces isparavanja. Kod višestupanjskih stanica povezana su dva ili više isparavanja, a supara iz jednog isparavanja služi kao ogrjevni medij za drugo isparavanje. Ovakvim višestupanjskim isparavanjem smanjenaje potrošnja pare za istu količinu isparenja iz namirnica. Toplinsku efikasnost također možemo poboljšati korištenjem supare ili kondenzata za predgrijavanje namirnica prije ulaska u isparivač. Predgrijavanjem radimo rekuperaciju topline koji bismo inače bacili u okoliš.[4]

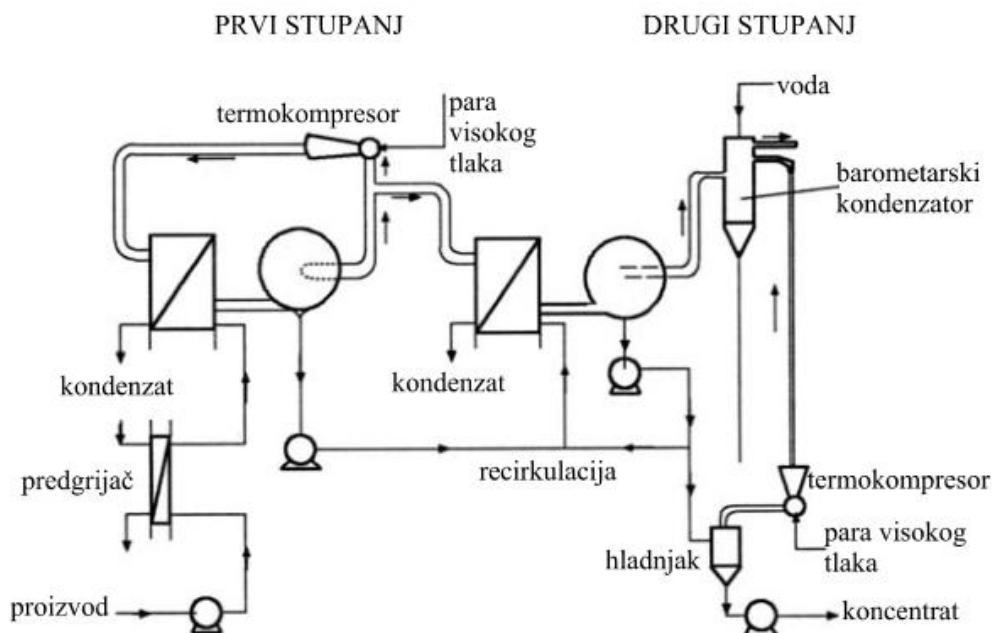


Slika 8. Cijevni isparivač s prisilnom cirkulacijom[4]

Najčešća vrsta podjele isparnih stanica je prema vrsti izmjenjivača topline odnosno grijalice. S tim kriterijem isparivače svrstavamo u sljedeće skupine[4]

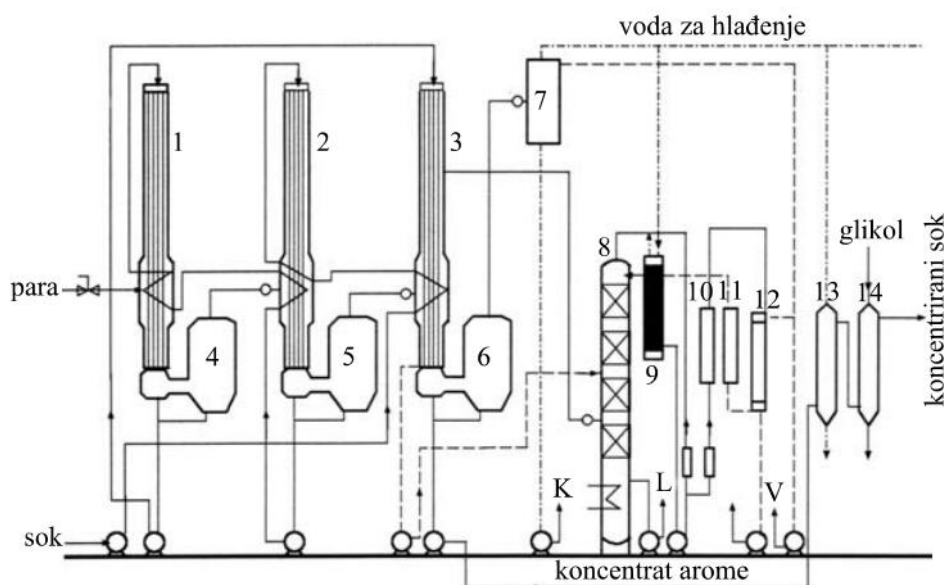
1. isparivači s cijevnom grijalicom s prirodnom ili prisilnom cirkulacijom
  - a. vertikalne cijevi s uzlaznim filmom
  - b. vertikalne cijevi s padajućim filmom
  - c. koso položene cijevi
  - d. horizontalne cijevi
2. isparivači s pločastim izmjenjivačem
3. isparivači sa stacionarnom cilindričnom ogrjevnom površinom i pokretnim filmom
4. isparivači s cilindričnom ogrjevnom površinom

5. isparivači sa stacionarnom konusnom ogrjevnom površinom
6. isparivači s rotirajućom konusnom ogrjevnom površinom



**Slika 9. Dvostupanjskasparna stanica s pločastim izmjenjivačem topline[4]**

U današnje vrijeme isparne stanice se često kombiniraju s uređajima za rekuperaciju i koncentriranje arome. Kod uređaja za rekuperaciju i koncentriranje arome primjenjuje se princip frakcijske destilacije s različitim tehničkim rješenjima i kombinacijama. [4]



**Slika 10. Postrojenje za uparavanje voćnog soka i rekuperaciju arome[4]**

## **2.4 Korištenje pare za grijanje i zagrijavanje potrošne tople vode**

Osim kao izvor topline za različite procese koji se vrše u prehrambenoj industriji proizvedenu paru možemo upotrijebiti kao izvor topline za grijanje i zagrijavanje potrošne tople vode. Ovakva uporaba pare je instinktivna i jednostavno izvediva. Paru razvodimo do izmjenjivača topline u kojima ona predaje toplinu ili vodi za grijanje ili potrošnoj toploj vodi. Izmjenjivače topline se najčešće izvode kao cijev u cijevi izmjenjivači topline.

### 3. Matematički model

Matematički model je opis nekog realnog sustava pomoću matematičkih izraza i ideja. Matematički modeli se primjenjuju u širokom spektru ljudskog djelovanja, od prirodnih znanosti i inženjerskih disciplina do društvenih znanosti i ekonomije. Uz to što obuhvaćaju različita područja ljudskog djelovanja postoje i različite vrste matematičkih modela. Često u jednom matematičkom modelu kombiniramo strukture različitih vrsta matematičkih modela.

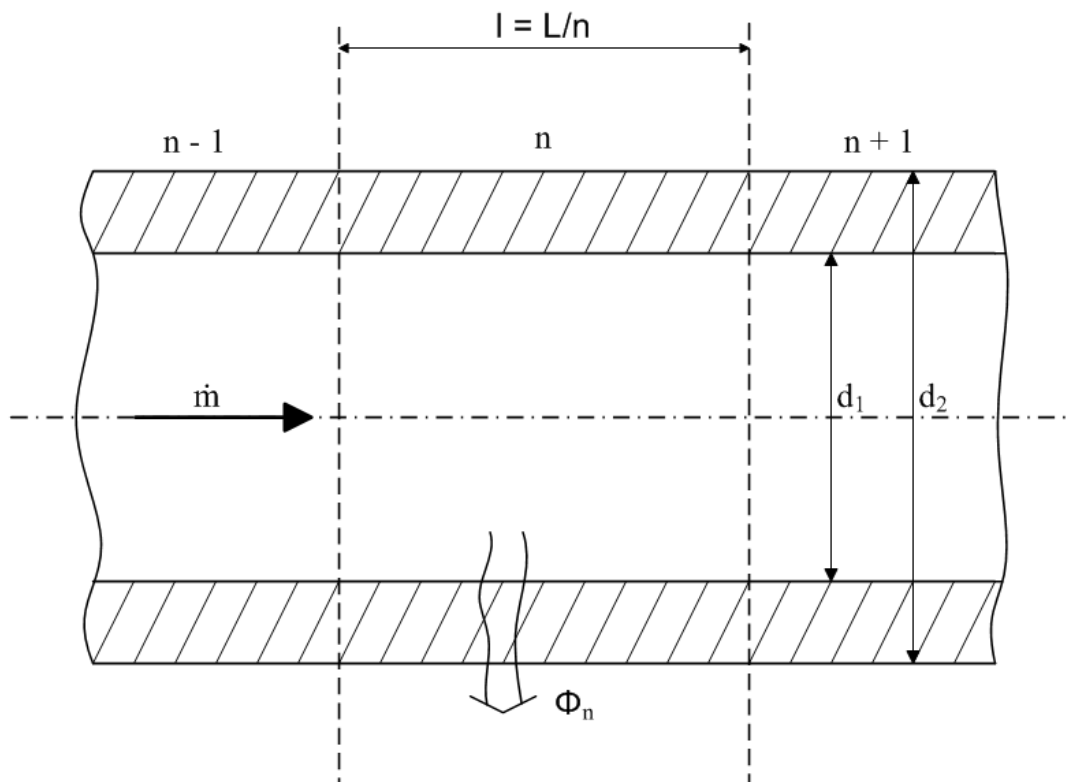
Cilj je opisati procese u sustavu kako bi mogli promatrati ponašanje sustava u različitim situacijama, odrediti utjecaj pojedinih komponenti ili predvidjeti buduće ponašanje. Pri postavljanju matematičkog modela nije uvijek moguće obuhvatiti sve dijelove realnih procesa koji se zbivaju u sustavu već je potrebno uvesti određene pretpostavke i aproksimacije. Naime realni procesi su složeni i često stohastičke prirode što znatno otežava njihov zapis matematičkim izrazima. Pretpostavke i aproksimacije nam pomažu da unatoč složenoj i stohastičkoj prirodi sustava stvorimo njegov matematički model. Pretpostavke određuju uvjete pri kojima matematički model vjerno opisuje svojstva uzročno-posljedičnih veza modeliranih matematičkim modelom[5]. Aproksimacije su pojednostavljenja koja uvodimo prilikom izrade matematičkog modela, a često ih moramo uvesti zbog nepoznavanja pojedinosti procesa u sustavu. Uvođenjem aproksimacija pojednostavljujemo matematički model te olakšavamo njegovo rješavanje. Poželjno je da matematički model bude jednostavan, ali onoliko jednostavan da još uvijek može opisati fenomene u sustavu koji želimo promatrati odnosno uzročno-posljedične veze od značaja. Dakle prilikom izrade matematičkog modela potrebno je poznavati što želimo promatrati u sustavu kako bi dobili prikladan model.

#### 3.1 Model procesa u parovodu

Para u cijev ulazi u suhozasićenom stanju. Zbog razlike između temperature pare i okoliša dolazi do uspostavljanja toplinskog toka između pare i okoliša. Toplinski tok koji od pare odlazi prema okolišu smanjuje energetska sadržaj pare te dolazi do kondenzacije pare. Cilj matematičkog modela je izračunati za koliko se smanji energetska sadržaj pare odnosno koliko iznosi toplinski tok od pare prema okolišu.



Kao relevantnu jednadžbu za stanje u parovodu uzet ćemo jednadžbu očuvanja energije, jedan od osnovnih zakona fizike. Cijev ćemo podijeliti na  $n$  segmenata u kojima ćemo pretpostaviti koncentrirane parametre.



Slika 11. Podjela parovoda na segmente

Za svaki od  $n$  segmenata napišemo jednadžbu očuvanja energije:

$$\frac{dM_n h_n}{dt} = \dot{m} * (h_{n-1} - h_n) - \phi_n \quad (1)$$

Pošto nećemo uvoditi promjene ulaznih ili rubnih vrijednosti tijekom proračuna dovoljno je promatrati samo stacionaran oblik jednadžbe očuvanja energije. U stacionarnom stanju su sve vremenske promjene veličina jednake nuli. Za segment  $n$  jednadžba očuvanja energije za stacionarno stanje glasi:

$$0 = \dot{m} * (h_{n-1} - h_n) - \phi_n \quad (2)$$

Iz jednadžbe (2) vidimo da će se specifična entalpija između segmenata promjeniti za vrijednost  $\phi/\dot{m}$ . Ako hladimo suhozasićeno paru ona kondenzira, dio pare prelazi u kapljevitu fazu. Tako dobivamo dvofazno stanje koje nazivamo mokra para. Mokra para se nalazi su zasićenom području. U zasićenom području postoji termodinamička ravnoteža između parne i kapljevite faze, odnosno parna faza i kapljevita faza su na istom tlaku i istoj temperaturi[6]. Unutar zasićenog područja stanje mokre pare nije jednoznačno određeno tlakom i temperaturom. Potrebno je definirati dodatnu veličinu kako bi u potpunosti determinirali toplinsko stanje heterogenog sustava kapljevina – para. Za tu svrhu je definirana veličina sadržaj pare:

$$x = \frac{\text{masa suhozasićene pare}}{\text{masa mokre pare}} = \frac{m''}{m' + m''} \quad (3)$$

Uz definirani sadržaj pare slijedi izraz za specifičnu entalpiju mokre pare:

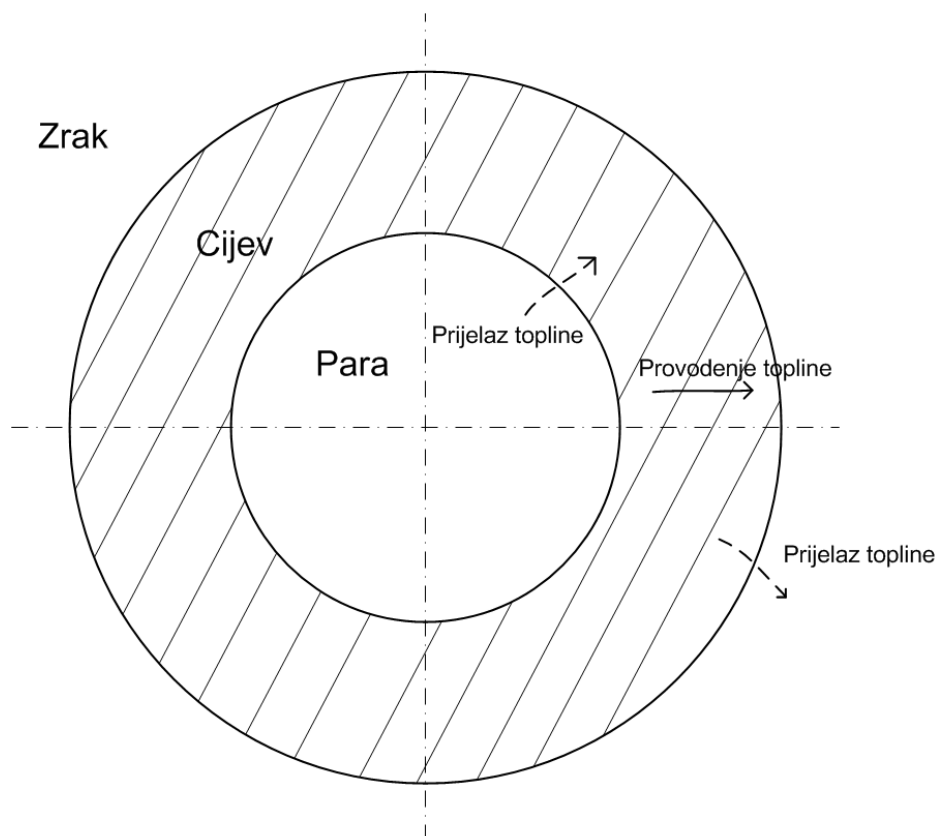
$$h = h' + x * (h'' - h') \quad (4)$$

Kondenzacijom pare će sadržaj pare padati iz segmenta u segment. Sadržaj pare za  $n$ -ti segment parovoda možemo dobiti kombiniranjem jednadžbi (2) i (4).

$$x_n = x_{n-1} - \frac{\phi_n}{\dot{m} * (h'' - h')} \quad (5)$$

### 3.2 Toplinski tok

Toplinski tok koji se uspostavlja između pare i okoliša ovisi o termodinamičkom stanju pare, geometrijskim i toplinskim svojstvima stijenke cijevi i moguće izolacije te o termodinamičkom stanju vanjskog zraka. Pošto stanje pare u cijevi ovisi o toplinskom toku, a toplinski tok o stanju pare sustav jednadžbi koji ćemo dobiti će biti nelinearnog karaktera. Dva su mehanizma prijenosa topline zastupljena u toplinskom toku između pare i vanjskog zraka, prijelaz topline i provođenje topline. Provođenje topline se odvija kroz stijenku cijevi i izolaciju, dok se mehanizam prijelaza topline javlja između pare i unutarnje stijenke cijevi te vanjske stijenke cijevi ili izolacije i vanjskog zraka.



Slika 12. Mehanizmi izmjene topline

### 3.2.1 Provođenje topline

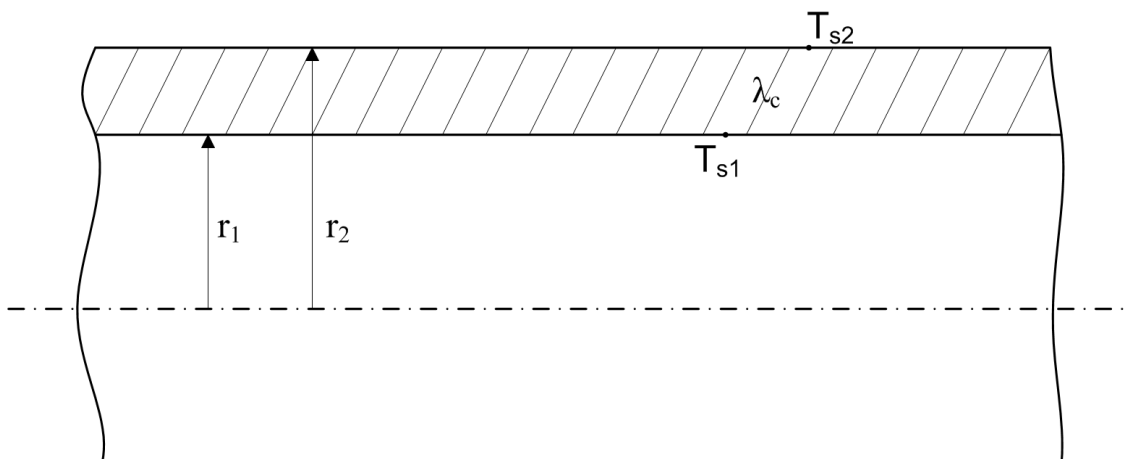
Provođenje topline kroz cijevnu stijenku je najbolje opisati u cilindričnim koordinatama jer je u njima najlakše opisati položaj točaka cijevne stijenke. Pretpostavit ćemo da je širenje topline dominantno u radijalnom smjeru te ćemo zanemariti gradijente temperature u aksijalnom smjeru. Toplinska svojstva stijenke cijevi i izolacije ćemo uzeti kao konstantna s obzirom na temperaturu. Uzevši u obzir dane pretpostavke, diferencijalna jednačba za temperaturno polje kod stacionarnog provođenja topline glasi[7]:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (6)$$

Jednačbu (6) ćemo integrirati za slučaj jednoslojne stijenke ( što odgovara slučaju stijenke cijevi bez izolacije) i dobiti izraz za temperaturno polje kao funkciju varijabljer:

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (7)$$

$C_1$  i  $C_2$  su konstante za čije je određivanje potrebno zadati rubne uvjete. Za njihovo određivanje zadat ćemo izotermni rubni uvjet. Kod izoternog rubnog uvjeta zadane su temperature na unutrašnjem i vanjskom rubu stijenke.



Slika 13. Jednoslojna stijenka i izotermni rubni uvjeti

Nakon uvrštavanja rubnih uvjeta temperaturno polje glasi:

$$T(r) = T_{s1} - (T_{s1} - T_{s2}) \frac{\ln r_1}{\ln r_1/r_2} \quad (8)$$

*Fourierov* zakon povezuje povezuje gradijent temperaturnog polja u smjeru normale i gustoću toplinskog toka[7].

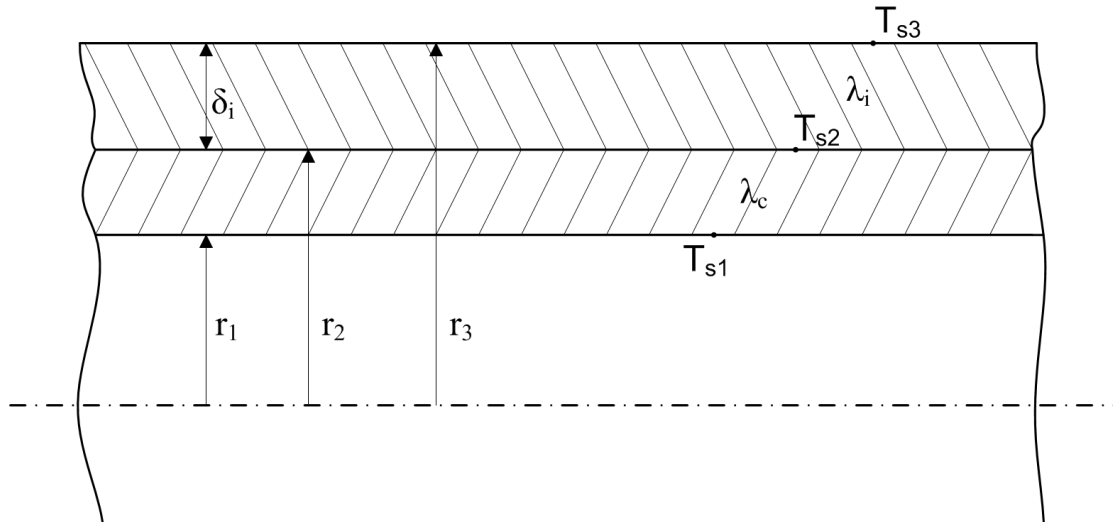
$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (9)$$

Ukupni toplinski tok glasi

$$\phi = \int_A q(A) dA \quad (10)$$

Kombinacijom jednačbi (8), (9), (10) uz izraz za površinu oplošja cilindra  $A = 2\pi rL$  dobijemo izraz za toplinski tok kod provođenja u jednoslojnoj cijevnoj stijenci:

$$\phi = \frac{2\pi L(T_{s1} - T_{s2})}{\frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (11)$$



Slika 14. Provođenje kroz stijenku cijevi i izolaciju

Za izračunavanje toplinskog toka u slučaju provođenja kroz stijenku cijevi i izolaciju iskoristit ćemo jednadžbu (11). Pretpostavimo da su nam poznata geometrija te toplinska svojstva stijenke cijevi i izolacije i temperature na unutarnjem te vanjskom rubu u skladu s izotermnim rubnim uvjetima. Uz navedene pretpostavke potrebna je još pretpostavka o savršenom dodiru između izolacije i stijenke cijevi. Mora vrijediti da je temperatura stijenke cijevi na radijusu  $r_2$  jednaka temperaturi izolacije na radijusu  $r_2$ . Prema jednadžbi (11) raspišemo toplinski tok kroz stijenku cijevi i kroz izolaciju.

$$\phi = \frac{2\pi L(T_{s1} - T_{s2})}{\frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (12)$$

$$\phi = \frac{2\pi L(T_{s2} - T_{s3})}{\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (13)$$

Jednadžbe (12), (13) zapišemo u obliku u kojem na jednoj strani ostaje samo temperaturna razlika:

$$\frac{\phi \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L \lambda_c} = T_{s1} - T_{s2} \quad (14)$$

$$\frac{\phi \ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L \lambda_i} = T_{s2} - T_{s3} \quad (15)$$

Zbrajanjem jednadžbi (14), (15) dobivamo izraz za toplinski tok provođenja kroz stijenu cijevi i izolaciju:

$$\phi = \frac{2\pi L(T_{s1} - T_{s3})}{\frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (16)$$

### 3.2.2 Prijelaz topline

Prijelaz topline je mehanizam prijenosa topline koji se najčešće javlja između krutine i tekućine. Molekule tekućine se slobodno gibaju, dok su molekule krutine smještene u čvrstoj strukturi i ne mogu se gibati već mogu samo titrati. Molekule tekućine koje su u blizini krutine predaju energiju molekulama krutine sudarajući se u njih. Gustoća toplinskog toka kod prijelaza topline definirana je *Newtonovim* iskustvenim stavkom[7]:

$$q = \alpha * (T_{\infty} - T_s) \quad (17)$$

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha$  najčešće se određuje mjerenjem i iskustvenim izrazima. On ovisi o velikom broju faktora kao što su geometrija sustava, tip strujanja, termodinamička svojstva tekućine, termodinamičko stanje tekućine.

Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj stijenci ćemo izračunati po izrazu prema koji su dali *Akers i sur.*[8]

$$\alpha_1 = C * Re_{eq}^b * (Pr')^{1/3} \frac{\lambda'}{d_1} \quad (18)$$

U jednadžbi (18) C i b predstavljaju konstante koje ovise o  $Re_{eq}$ .

	$\frac{Re_{eq} < 5 \cdot 10^4}{Re_{eq} > 5 \cdot 10^4}$	
b	1/3	0.8
C	5.03	0.0265

Tablica 1. Konstante u izrazu za koeficijent prijelaza topline pri kondenzaciji

Ekvivalentni Reynoldsov broj,  $Re_{eq}$ , glasi

$$Re_{eq} = \frac{G_{eq} * d_1}{\mu'} \quad (19)$$

$G_{eq}$ , ekvivalentni masenifluks, se računa prema izrazu

$$G_{eq} = G * \left( (1 - x) + x \left( \frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0.5} \right) \quad (20)$$

gdje je  $G$  ukupni masenifluks i dobiva se iz izraza

$$G = \frac{4\dot{m}}{d_1^2 * \pi} \quad (21)$$

Za koeficijent prijelaza topline s vanjskog ruba prema zraku koristit ćemo izraz koji preporučuju Churchill i Bernstein[9]

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_z}{d_3} \left( 0.3 + \frac{0.62 Re_z^{\frac{1}{2}} * Pr_z^{\frac{1}{3}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.4}{Pr_z} \right)^{2/3} \right)^{1/4}} \left( 1 + \left( \frac{Re_z}{282000} \right)^{5/8} \right)^{\frac{4}{5}} \right) \quad (22)$$

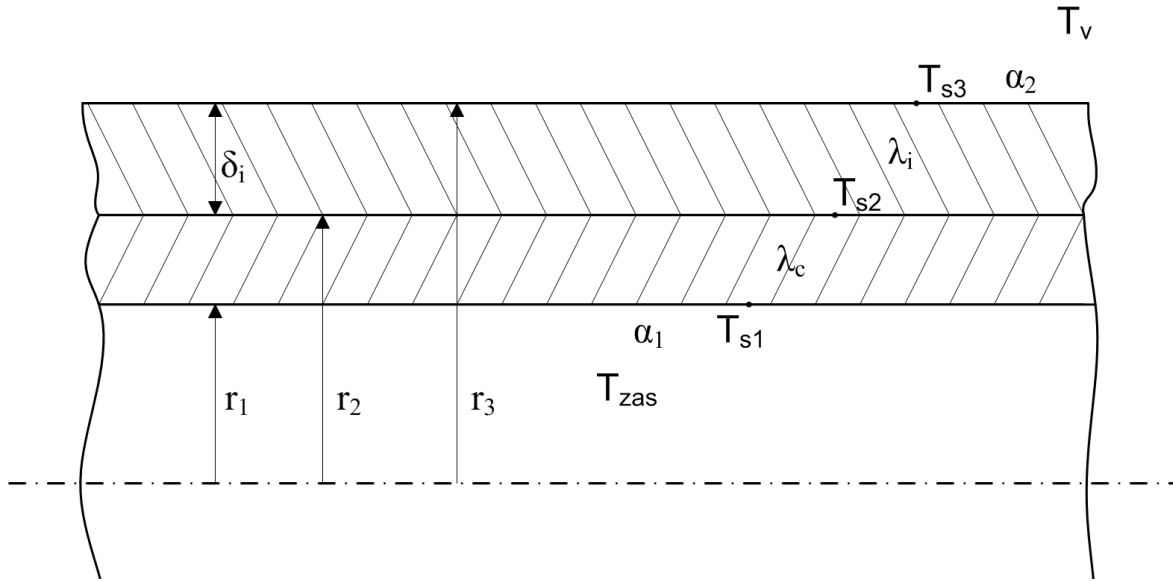
u kojem se  $Re_z$  računa sa vanjskim promjerom kao karakterističnom duljinom i koji vrijedi ako je  $Re_z * Pr_z > 0.2$ .

Sada možemo zapisati toplinski tok za prijelaz topline od pare na stijenku cijevi, provođenje kroz stijenku cijevi i izolaciju te prijelaz s izolacije na vanjski zrak

$$\phi = \alpha_1 2\pi r_1 L (T_{zas} - T_{s1}) \quad (23)$$

$$\phi = \frac{2\pi L (T_{s1} - T_{s3})}{\frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2}} \quad (24)$$

$$\phi = \alpha_2 2\pi r_2 L (T_{s3} - T_v) \quad (25)$$



Slika 15. Veličine relevantne za iznos toplinskog toka

Jednostavnom transformacijom jednadžbi (23), (24), (25) tako da na desnoj strani ostane samo razlika temperatura dobivamo sljedeće izraze

$$\frac{\phi}{\alpha_1 2\pi r_1 L} = (T_{zas} - T_{s1}) \quad (26)$$

$$\phi \frac{\frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L} = (T_{s1} - T_{s3}) \quad (27)$$

$$\frac{\phi}{\alpha_2 2\pi r_3 L} = (T_{s3} - T_v) \quad (28)$$

Zbrajanjem jednadžbi (26), (27), (28) slijedi konačan izraz za toplinski tok

$$\phi = \frac{2\pi L(T_{zas} - T_v)}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_2 r_3}} \quad (29)$$

Jednadžba (4) i jednadžba (29) raspisane za svaki od  $n$  segmenata čine sustav jednadžbi matematičkog modela. Njihovim rješavanjem dobit ćemo traženu vrijednost toplinskog toka. Sustav jednadžbi je riješen pomoću programskog paketa MATLAB<sup>®</sup>.



## 4. Optimiziranje parovoda

### 4.1 Postojeće stanje parovoda

Prvo ćemo iskoristiti matematički model kako bi vidjeli iznos toplinskog toka za postojeće stanje parovoda. Iz jednadžbe (2) vidimo da je iznos toplinskog toka jednak umnošku masenog toka i razlike specifičnih entalpija na ulazu u parovod i na izlazu iz parovoda. Parovod ćemo ispitati za različite situacije koje se javljaju njegovom realnom radu. Ispitivanjem za različite situacije moći ćemo vidjeti utjecaj faktora poput opterećenja odnosno masenog protoka i stanja okoliša na iznos toplinskih gubitaka. Poznavanje postojećeg stanja je potrebno kako bi mogli vidjeti koliko su dobra rješenja za smanjenje toplinskih gubitaka.

Matematički model ćemo primijeniti na dva različita promjera cijevi, nazivne promjere DN100 i DN150. Za isti maseni protok veći promjer znači manju brzinu strujanja u cijevi. Veće brzine strujanja imaju za posljedicu bolju izmjenu topline mehanizmom prijelaza topline. Kod većeg promjera cijevi također je veća površina za izmjenu topline što povećava toplinski tok.

Promjena protoka kod istog promjera uz promjenu brzine donosi i promjenu ukupne energije koja ulazi u parovod i koja je dostupna za interakciju s okolišem. Drugim riječima, ako imamo veći protok kroz parovod, kroz njega ide više energije i više energije se može izgubiti toplinskim tokom prema okolišu.

Uticaj promjene temperature vanjskog zraka na veličinu toplinskih gubitaka je vidljiv iz jednadžbe (29). Promjenom temperature vanjskog zraka mijenja se temperaturna razlika između temperature pare i vanjskog zraka. Kod toplinskog toka temperaturnu razliku možemo poistovjetiti s električnim potencijalom kod električne struje. Kod istog električnog otpora veći iznos električnog potencijala znači i veću jakost električne struje, odnosno veća količina naboja prođe kroz poprečni presjek vodiča u jedinici vremena. Analogno tome što je veća temperaturna razlika za iste uvjete strujanja te istu geometriju i toplinska svojstva cijevne stijenke i izolacije toplinski tok će biti veći.

Maksimalni protok kroz cijev iznosi 18 t/h dok je minimalni 2,5 t/h. Za temperature vanjskog zraka promatrane su temperature za zimski i ljetni dan kao dva granična slučaja u rasponu temperatura. Za zimski dan je uzeta srednja mjesečna temperatura za siječanj u Zagrebu 2013. godine koja iznosi 1,5°C, dok je za ljetni dan uzeta srednja mjesečna temperatura za srpanj

od 23,3°C također zabilježena u Zagrebu 2013. godine[10]. Osim temperatura potrebno je i odrediti brzinu vjetra kako bi mogli izračunati  $Re_z$  kojim u jednadžbi (22) računamo koeficijent prijelaza topline na vanjskoj stijenci cijevi. Brzina vjetra koju smo odabrali iznosi 2 m/s kao približna prosječna brzina vjetra na zagrebačkom području. Cijev je podijeljena na 200 segmenata.

DN100 $\phi$ [W]	$\dot{m}_{max}$		$\dot{m}_{min}$	
	$T_v$ za zimu	$T_v$ za ljeto	$T_v$ za zimu	$T_v$ za ljeto
	190910	160520	190590	160260

Tablica 2. Toplinski tok za promjer cijevi DN100

DN150 $\phi$ [W]	$\dot{m}_{max}$		$\dot{m}_{min}$	
	$T_v$ za zimu	$T_v$ za ljeto	$T_v$ za zimu	$T_v$ za ljeto
	238290	200110	237590	199570

Tablica 3. Toplinski tok za promjer cijevi DN150

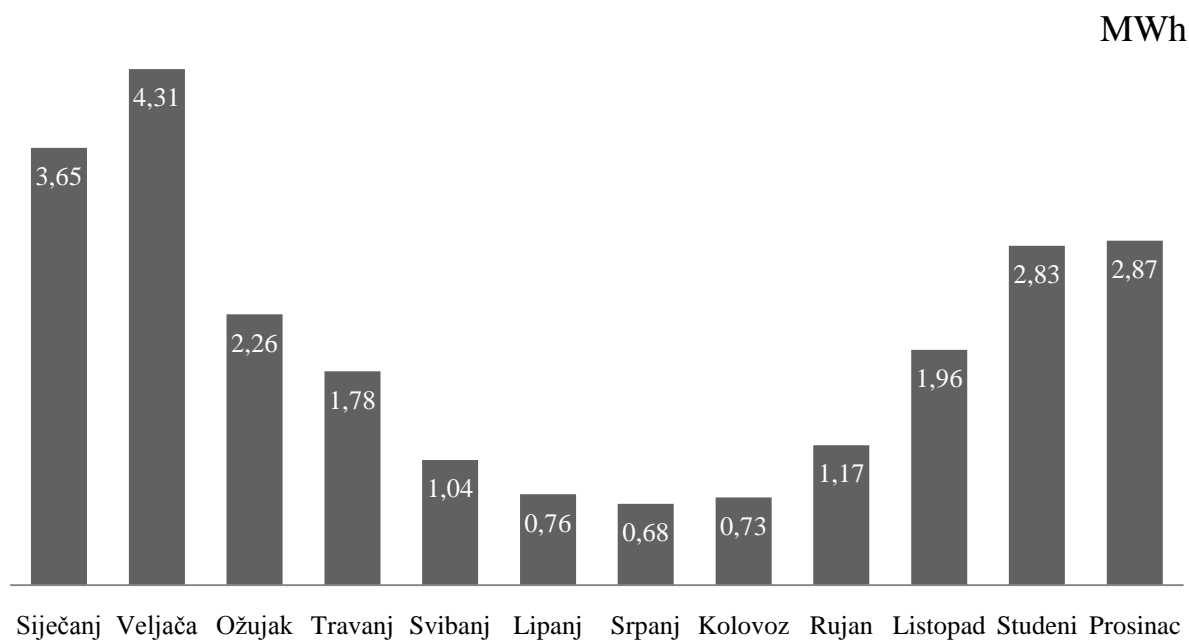
Iz tablica 2. i 3. vidimo značajan utjecaj promjera cijevi na veličinu toplinskog toka. Toplinski tokovi kod cijevi promjera DN150 su za 25% veći od toplinskih tokova kod cijevi promjera DN100. Toplina vanjskog zraka također ima značajan utjecaj na iznos toplinskog toka dok je utjecaj promjene protoka na veličinu toplinskog toka zanemariv.

Mjesečna potrošnja procesne pare je promjenjiva. U zimskim mjesecima kada se para koristi i za grijanje je veća.

Mjesec	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
Potrošnja pare [t]	344	406	213	200	117	85	76	82	131	185	267	271

Tablica 4. Mjesečna potrošnja pare

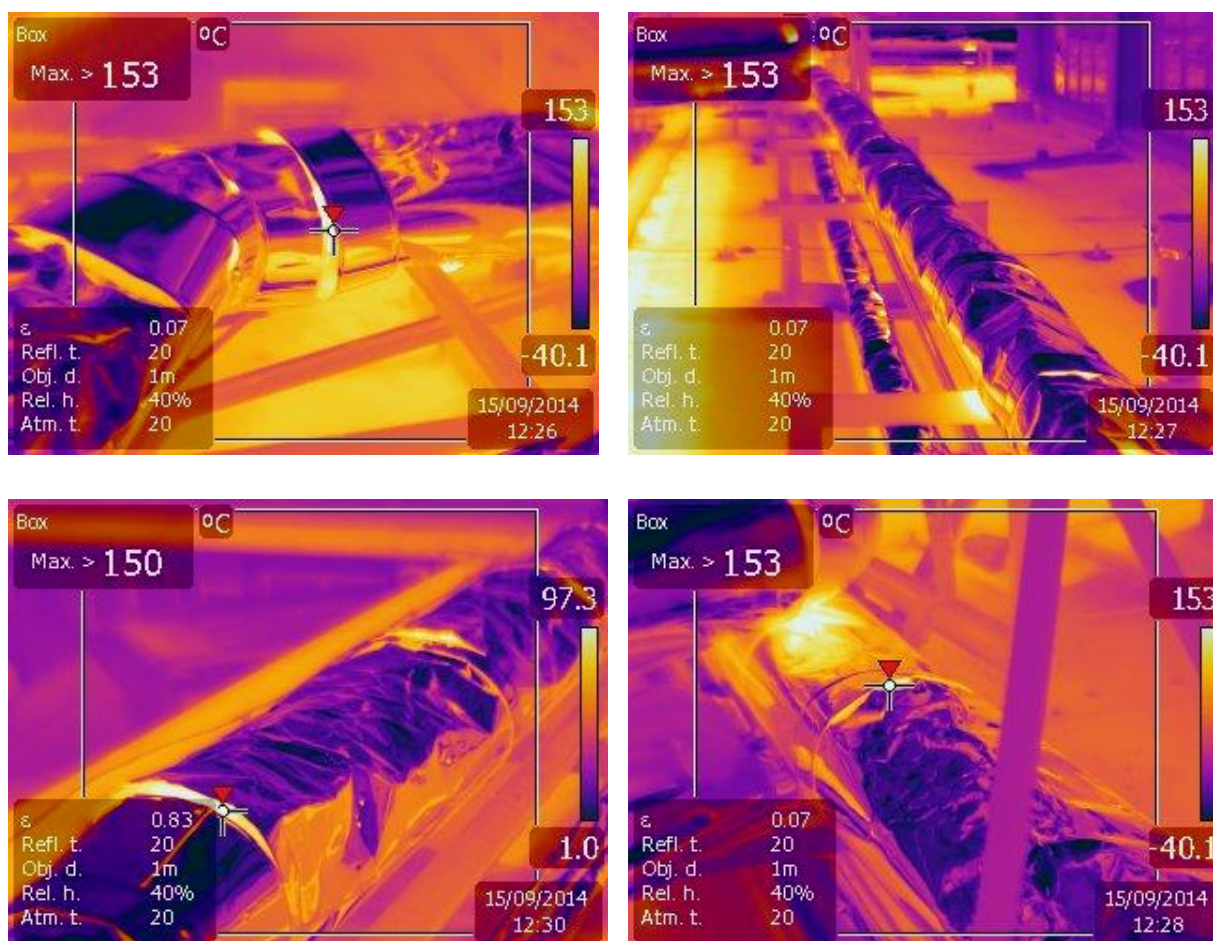
Poznavanjem mjesečne potrošnje pare i uporabom podataka iz tablice 2. izračunat ćemo toplinske gubitke za svaki mjesec. Pretpostavit ćemo da je sva para potrošena pri maksimalnom protoku. Za zimske mjesece kao i za listopad i studeni uzet je toplinski tok izračunat za siječanjsku srednju mjesečnu temperaturu dok je za ostale uzet toplinski tok izračunat za srpanjsku srednju mjesečnu temperaturu.



Slika 16. Gubitak topline po mjesecima

Na realnom parovodu je obavljeno snimanje termografskom kamerom. Termografske kamere zapažaju infracrveno područje elektromagnetskog spektra. Poznato je da sva tijela koja imaju temperaturu iznad apsolutne nule emitiraju infracrveno zračenje te je zbog toga infracrvenim kamerama moguće vidjeti okolinu bez prisutnosti vidljive svjetlosti. No primjena termografskih kamera u tehničke svrhe je drugačija. Termografsko snimanje može pomoću raznih algoritama i podataka interpretirati zračenje u infracrvenom spektru koje primjećuje termografska kamera kao temperaturu objekata koji je sniman kamerom. Dakle termografskim kamerama je moguće bezkontaktno izmjeriti temperaturu nekog objekta. No da bi mogli odrediti temperaturu nekog objekta potrebno je poznavati njegov emisijski faktor. Emisijski faktor označuje sposobnost materije da emitira toplinsko zračenje odnosno pokazuje koliko je puta toplinsko zračenje nekog realnog objekta manje od toplinskog zračenja crnog tijela. Crno tijelo je idealizirani objekt čiji je emisijski faktor jednak jedinici i ni jedno tijelo ne može imati veći emisijski faktor od njega. Emisijski faktor objekta čiju temperaturu želimo mjeriti moramo zadati termografskoj kameri prije snimanja. Postoje tablice koje sadrže podatke o emisijskom faktoru ovisno o vrsti materijala. Pošto emisijski faktor ovisi o temperaturi objekta i o stanju površine objekta određivanje iz tablica nije najtočnija metoda. Emisijski faktor se također može odrediti uporabom same termografske kamere. Uobičajena je metoda da u blizinu objekta, kojem želimo odrediti emisijski faktor, a kasnije i temperaturu,

postavimo drugi objekt poznatog emisijskog faktor. Za tu svrhu su razvijeni posebni sprejevi koji se nanese na objekt kojemu želimo izmjeriti emisijski faktor. Nakon što smo odredili emisijski faktor pomoću dijela objekta na koji je nanesen sprej, na dijelu na kojem nema spreja možemo obaviti mjerenje temperature.



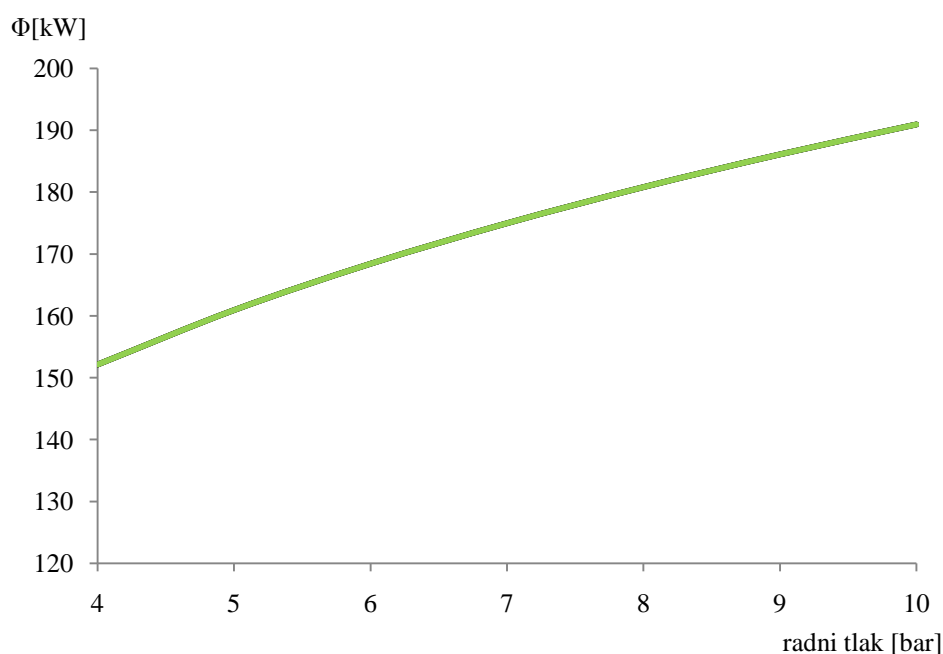
Slika 17. a) b) c) d) Termografska snimka parovoda

Termografske snimke parovoda pokazuju visoku temperaturu vanjske stijenke. Visoka temperatura je posljedica velikog toplinskog toka koji prolazi kroz stijenku. Kombinacijom jednačbi (26), (27) i (24) možemo pokazati ovisnost temperature vanjske stijenke o toplinskom toku.

$$T_{s3} = T_{zas} - \phi * \left( \frac{1}{\alpha_1 2\pi r_1 L} + \frac{\frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L} \right) \quad (30)$$

## 4.2 Sniženje parametara svježe pare na ulazu

Iz proračuna toplinskih gubitaka za postojeće stanje vidjeli smo utjecaj temperaturne razlike na veličinu toplinskog toka. Na temperaturu vanjskog zraka ne možemo utjecati, ali možemo utjecati na temperaturu kojom para ulazi u parovod i tako smanjiti temperaturnu razliku kako bi smanjili toplinske gubitke. Para ulazi u parovod u suhozasićenom stanju. Za suhozasićeno stanje temperatura i tlak su jednoznačno povezani, tako da ćemo smanjenjem tlaka dobiti i smanjenje temperature. Radni tlak u postrojenju iznosi 10 bara. Pomoću matematičkog modela ćemo ispitati kakav je utjecaj smanjenja tlaka na iznos toplinskih gubitaka. Pri tome ispitivanju ćemo uzeti da je vanjska temperatura zraka jednaka onoj koju smo odabrali za zimu, protok maksimalan, a promjer cijevi DN100.



Slika 18. Ovisnost toplinskog toka o radnom tlaku

Smanjenjem radnog tlaka pare na 7 bara toplinski tok se smanjuje tek za 8% dok se smanjenjem na 5 bara toplinski tok smanjuje za 15%. Vidimo da ovo rješenje ne donosi pretjerano smanjenje u toplinskim gubicima. Da bi uopće smanjili tlak na 5 bara moramo vidjeti koji je tlak odnosno temperatura potrebna u uređajima koji se primjenjuju u pogonu. Moguće je da su parametri pare na 5 bara nedovoljni da opskrbe postrojenje potrebnom toplinskom energijom ili da je tlak prenizak da se ostvari željeni tok pare kroz uređaje koji se primjenjuju u pogonu.

## 4.2 Izolacija

Uloga izolacije je smanjenje toplinskog toka. Izolacija je načinjena od materijala male toplinske vodljivosti. Kao što možemo vidjeti u jednadžbi (9) toplinska vodljivost je koeficijent proporcionalnosti između temperaturnog gradijenta i gustoće toplinskog toka. Niska toplinska vodljivost znači da će za isti temperaturni gradijent gustoća toplinskog toka, a time i sam toplinski tok biti manji. Jedan od članova iz nazivnika u jednadžbi (16) možemo zapisati kao :

$$\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_2 + \delta_i}{r_2} = \frac{1}{\lambda_i} \ln \left(1 + \frac{\delta_i}{r_2}\right) \quad (31)$$

Ako se vratimo na analogiju toplinskog toka i toka struje onda je nazivnik u jednadžbi (16) analogan električnom otporu odnosno on predstavlja toplinski otpor. U jednadžbi (31) vidimo utjecaj debljine izolacije na veličinu toplinskog otpora. Što je veća debljina izolacije to je veći toplinski otpor. Jednadžba (31) također potvrđuje otprije donesene zaključke o utjecaju toplinske vodljivosti na toplinski tok. Kako se toplinska vodljivost smanjuje tako raste toplinski otpor.

Od kontaktiranih dobavljača dobivene su četiri opcije za izolaciju parovoda. Jedan od preduvjeta za izolacijski materijal pogodan za izolaciju parovoda je otpornost na visoke temperature. Sve izolacije koje su dobavljači ponudili načinjene su od mineralne vune, materijala otpornog na visoke temperature i time pogodnog za izolaciju parovoda. Mineralna ili kamena vuna dobiva se iz kamenih minerala dolomita, bazalta i dijabaza. Struktura joj se sastoji od gusto naslaganih vlakana. Sama vlakna dobro provode topline, ali kada ih gusto složimo u slojeve ona mogu dobro uhvatiti i zatvoriti zrak koji je odličan toplinski izolator.

Svaki od četiri ponuđena tipa izolacije dolazi u različitim debljinama. Većom debljinom više smanjujemo toplinski tok, ali je zato cijena veća te je stoga potrebno provesti analizu izolacija različitih debljina ne samo s tehničkog gledišta nego i financijskog. Kombinirana analiza tehničkih i financijskih aspekata nekog objekta naziva se tehno-ekonomskom analizom. Krajnji cilj tehno-ekonomske analize je vidjeti koji će tip izolacije za koju debljinu dati najbrži povrat investicije.

Izolacije koje ćemo analizirati imenovane su slovima; izolacija A, izolacija B, izolacija C i izolacija D.

$\delta_i$ [mm]	20	25	30	40	50	70	80	90	100	120
cijena [kn/1,2m]	26,55	35,35	41,8	53,1	65,04	96,51	115,15	129,9	144,63	155,7
$\lambda_i$ [W/m K]	0,053									

Tablica 5. Debljine, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju A

$\delta_i$ [mm]	20	30	40	50	60	70	80	100
cijena [kn/m]	25,68	31,88	38,66	51,79	65,06	70,97	86,98	106,75
$\lambda_i$ [W/m K]	0,038							

Tablica 6. Debljina, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju B

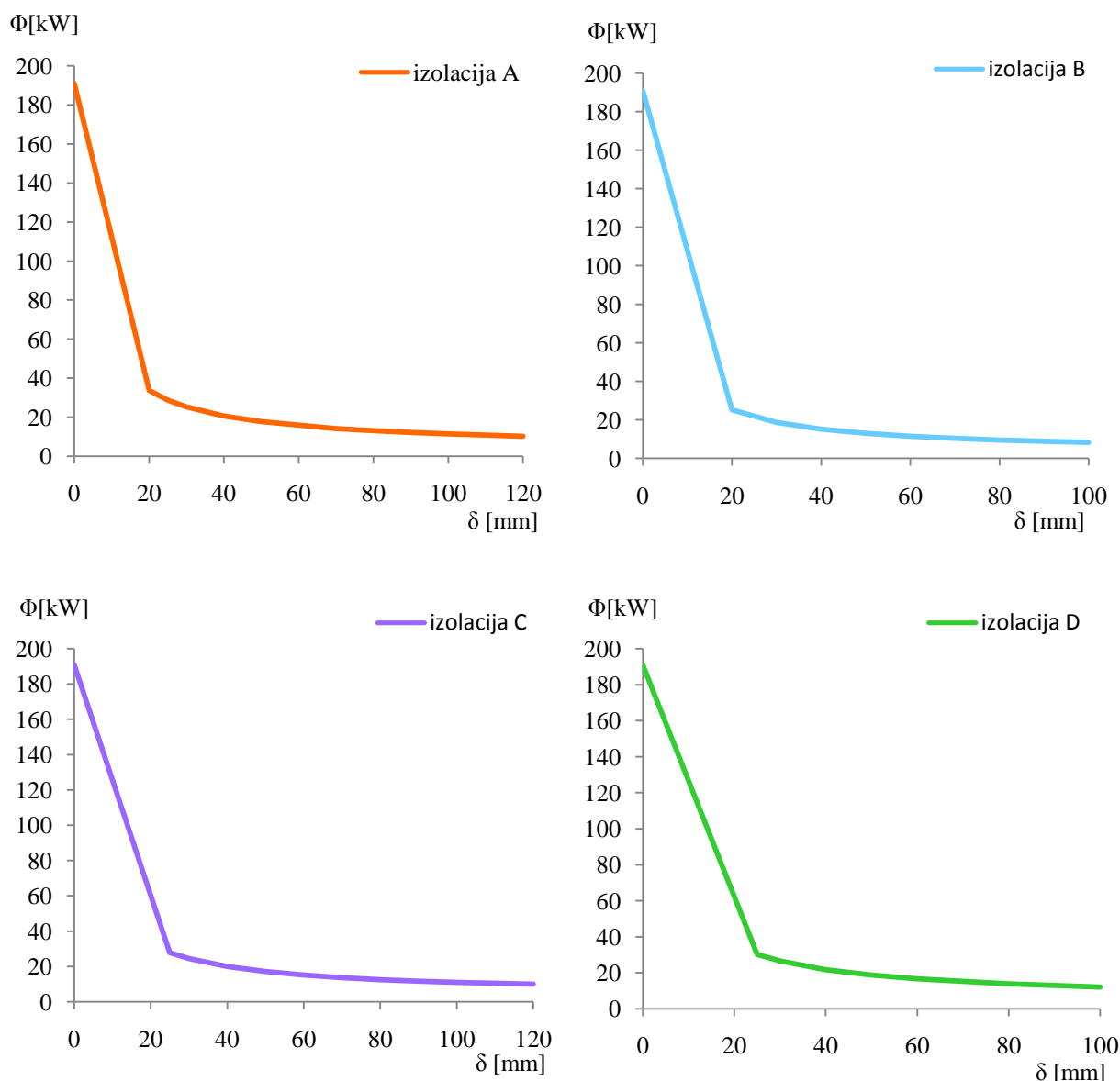
$\delta_i$ [mm]	25	30	40	50	60	70	80	90	100	120
cijena [kn/m]	57,9	50,73	62,47	83,06	91,15	116,14	122,34	135,79	151,84	246,6
$\lambda_i$ [W/m K]	0,051									

Tablica 7. Debljina, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju C

$\delta_i$ [mm]	25	30	40	50	60	80	100
cijena [kn/m]	28	30	35	45	55	80	115
$\lambda_i$ [W/m K]	0,056						

Tablica 8. Debljina, toplinska provodnost i cijena po debljinama za izolaciju D

Prvo ćemo za svaku debljinu svake od izolacija izračunati toplinski tok. Za to ćemo upotrijebiti matematički model. Toplinski tok za pojedinu debljinu ćemo računati sa istim parametrima kao što smo računali toplinske tokove za različite radne tlakove, promjer cijevi DN100, maksimalni protok, temperatura zraka za zimski dan.



Slika 19. a) b) c) d) Promjena toplinskog toka s debljinom izolacije

Slika 16. prikazuje kako stavljanje izolacije najmanje dostupne debljine drastično smanjuje toplinski tok. Daljnje povećanje debljine izolacije ne donosi daljnja drastična smanjenja toplinskog toka, ali on se i dalje smanjuje zbog daljnjeg povećanja toplinskog otpora.

Toplinski tok koji izračunamo pomoću matematičkog modela predstavlja gubitke u jednoj sekundi. Za ekonomsku analizu isplativosti potrebni su gubici u cijeloj godini. Tijekom godine kroz parovod prođe 2378 tona pare. Pretpostavit ćemo da sva ta para kroz parovod prostruji maksimalnim protokom. Vrijeme strujanja pare kroz parovod na godišnjoj razini izračunat ćemo jednostavnim izrazom



$$t_{uk} = \frac{M_{uk}}{\dot{m}_{max}} \quad (32)$$

Poznavajući koliko vremena para struji kroz parovod godišnje te toplinski tok za svaki od tipova izolacija i njihovih dostupnih debljina sljedećom formulom možemo izračunati koliko topline izgubimo godišnje

$$Q_{uk} = t_{uk} * \phi \quad (33)$$

Para predstavlja naš proizvod. Gubitkom topline dolazi do kondenzacije pare, odnosno do gubitka proizvoda. Ugradnjom izolacije smanjujemo toplinske gubitke i masu kondenzirane pare koja predstavlja gubitak. Kako bi izračunali koliko masu pare izgubimo u godini moramo iskoristiti sljedeći izraz

$$\Delta M = \frac{Q_{uk}}{h'' - h'} \quad (34)$$

Za proizvodnju pare potrebno je uložiti novac u opremu i ljudski rad te u energente. Proizvedena para ima svoju cijenu, a prema izrazu

$$P = E * \Delta M \quad (35)$$

možemo izračunati koliko smo novaca izgubili zbog kondenzacije pare, odnosno toplinskih gubitaka. Pošto ugradnjom izolacije smanjujemo novčane gubitke zbog instalacije izolacije razliku gubitaka između neizolirane cijevi i izolirane cijevi možemo uzeti kao zaradu od izolacije. No da bi zaradili od izolacije potrebno je uložiti novac u njezinu nabavku. Cijena investicije u izolaciju iznosi

$$I = Y * L \quad (36)$$

Y je cijena izolacije po metru duljine tako da za izolaciju A moramo cijenu koju smo dobili od dobavljača podijeliti sa 1,2.

Jednostavni period povratka ulaganja pokazuje koliko brzo ćemo vratiti investiciju bez uzimanja u obzir troškova izvođenja radova instalacije ili troškova održavanja. Računa se izrazom

$$JPPU = \frac{I}{P} \quad (37)$$

Primjenom jednadžbi od (32) do (37) u tabličnom kalkulatoru uz toplinske tokove koje smo izračunali pomoću matematičkog modela izračunamo jednostavni povrat ulaganja za svaku izolaciju koje su nam ponudili dobavljači.

$\delta_i$ [mm]	20	25	30	40	50	70	80	90	100	120
JPPU	0,4	0,51	0,59	0,73	0,88	1,28	1,52	1,71	1,9	2,03

**Tablica 9. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju A**

$\delta_i$ [mm]	20	30	40	50	60	70	80	100
JPPU	0,44	0,52	0,62	0,82	1,02	1,11	1,35	1,65

**Tablica 10. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju B**

$\delta_i$ [mm]	25	30	40	50	60	70	80	90	100	120
JPPU	1	0,86	1,03	1,35	1,46	1,85	1,94	2,14	2,38	3,85

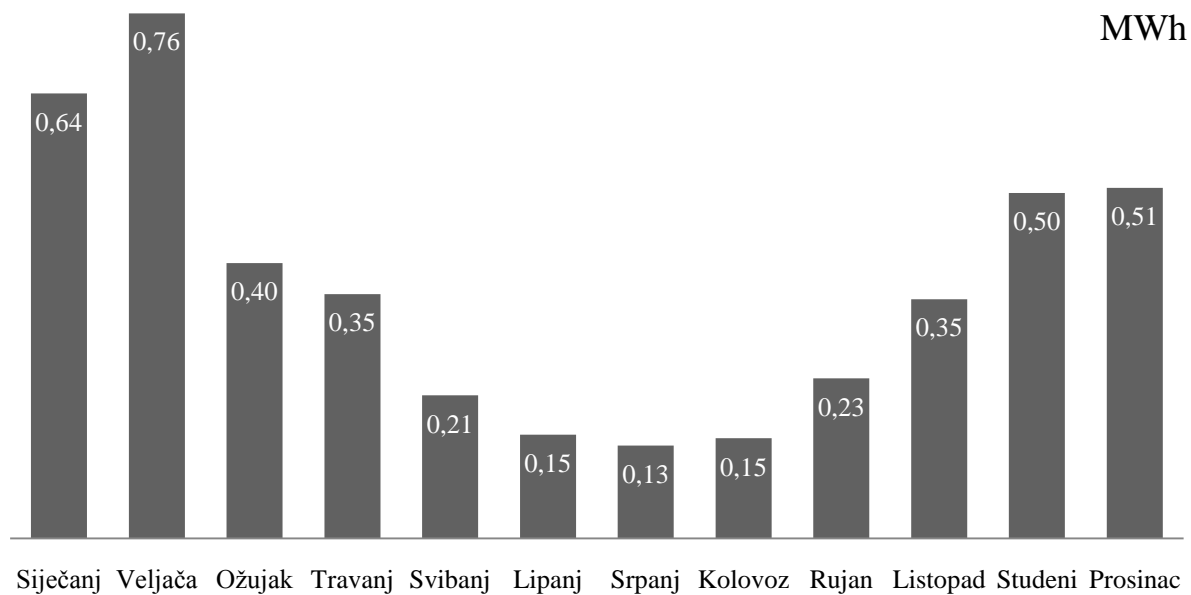
**Tablica 11. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju C**

$\delta_i$ [mm]	25	30	40	50	60	80	100
JPPU	0,49	0,52	0,58	0,74	0,89	1,27	1,81

**Tablica 12. Jednostavni period povratka ulaganja za izolaciju D**

Vidimo da je jednostavni period povratka ulaganja najmanji za početne debljine izolacija osim u slučaju izolacije C gdje je cijena izolacije po metru manja kod druge najmanje debljine nego kod prve. Uzrok tomu je to što stavljanjem te najmanje debljine izolacije drastično smanjujemo toplinske gubitke dok daljnjim povećanjem debljine izolacije ne smanjujemo toplinske gubitke u tolikoj mjeri, a veličina investicije značajno raste. Zbog toga veće debljine izolacija nisu financijski toliko povoljne kao početne debljine.

Izolacija A debljine 20 mm ima najkraći jednostavni period povratka ulaganja te ćemo za nju izračunati toplinske gubitke za svaki mjesec. Upotrijebit ćemo iste pretpostavke kao što smo upotrijebili pri izračunu mjesečnih toplinskih gubitaka za cijev bez izolacije.



Slika 20. Gubitak topline po mjesecima za cijev izoliranu izolacijom A debljine 20 mm

Usporedimo li ove vrijednosti sa onima za cijev bez izolacije (Slika 16) ponovno možemo vidjeti koliko izolacija smanjuje toplinske gubitke.

## **5. Zaključak**

Postojeće stanje parovoda donosi značajne toplinske gubitke. Iznos toplinskog toka izračunat matematičkim modelom potvrđuje njihovu veličinu. Snimanje termografskom kamerom je pokazalo kako su temperature na vanjskoj stijenci cijevi visoke. Visoka temperatura na stijenci cijevi parovoda posljedica je velikih toplinskih gubitaka.

Smanjenje radnog tlaka nije značajno smanjilo iznos toplinskog gubitka izračunatog matematičkim modelom. Ova metoda smanjenja toplinskih gubitaka je također je ograničena potrebama pogona i predstavlja neefikasno rješenje smanjenja toplinskih gubitaka.

Proračunom je pokazano koliko sama primjena izolacije smanjuje toplinski tok, neovisno o debljini izolacije koju smo ugradili. Za sam odabir debljine izolacije izračunat je jednostavan period povratka ulaganja za svaku od debljina. Izračun jednostavnog perioda povratka ulaganja pokazao da je financijski najisplativije uzeti tanje izolacije čija je cijena niža. Sam iznos jednostavnog perioda povratka ulaganja za financijski najisplativiju izolaciju je manji od pola godine. S ovako brzim vraćanjem investicije izolacija predstavlja odlično rješenje za smanjenje toplinskih gubitaka.

## Literatura

- [1] Cox, P. M. , Betts, R. A. , Jones, C. D., Spall, S. A. & Totterdell, I. J. : Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature* 2000. , 408, 184-187
- [2] <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-8/assessment-2> , 25.02.2015
- [3] Einstein, D., Worrell, E., Khrushch, M.: Steam systems in industry: Energy use and energy efficiency improvement potentials, Lawrence Berkeley National Laboratory 2001.
- [4] Lovrić, T. : Procesi u Prehrambenoj Industriji s Osnovama Prehrambenog Inženjerstva, Hinus, Zagreb, 2003.
- [5] [http://powerlab.fsb.hr/DinamikaProcesa/Matmod\\_uvod\\_novo.pdf](http://powerlab.fsb.hr/DinamikaProcesa/Matmod_uvod_novo.pdf), 02.02.2015.
- [6] Galović A. : Termodinamika I , Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [7] Galović A. : Termodinamika II , Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010.
- [8] Akers, W. W., Deans, H. A., and Crosser, O. K. : Condensing heat transfer within horizontal tubes *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, vol. 55, pp. 171–176, 1959.
- [9] Churchill, S. W.; Bernstein, M. :A Correlating Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Crossflow, *Journal of Heat Transfer* 1977. , 99 300–306
- [10] Bašić, K., Grgić, I., Polić, L, Bročić, P., Sović, I., Likso T., Mlinek, D., Hercigonja. D, Škevin-Sović. J, Igrec, I., Roberta Abdula, R. : Geografski i meteorološki podaci, *Statistički ljetopis Republike Hrvatske* 2014., 39-56

## **Prilozi**

- I. Programski kod
- II. Prikaz odabranih međurezultata po segmentima
- III. CD-R disk

## Prilog I : Programski kod

Za izradu rada napisane su sljedeće MATLAB<sup>®</sup> skripte: jedan.m te dva.m.

### jedan.m

```
global m dvdu Tv g T_s h_vk h_sz mi_vklseg r_kon n lmd_vkPr_vk
global alf_2 rho_vkrho_sz

%ULAZNI PODACI
%Para
    p_s=10;                %[bar] ulazni tlak pare
    m=18/3.6;              %[kg/s] maseni protok pare (uvrstit u [t/h])
%Cijev
    L=200;                 %[m] duljina cijevi
    %DN100
    d2=114.3/1000;         %[m] vanjski promjer
dlt_c=3.6/1000;           %[m] debljina stijenke
    d1=d2-2*dlt_c;         %[m] unutarnji promjer
    %DN150
    d2=168.3/1000;         %[m] vanjski promjer
    dlt_c=4.5/1000;         %[m] debljina stijenke
    d1=d2-2*dlt_c;         %[m] unutarnji promjer
lmd_c=43;                 %[W/m °C] toplinska vodljivost cijevi
%Izolacija
lmd_i=0.053;
dlt_i=20/1000;
    %dlt_i=25/1000;
    %dlt_i=30/1000;
    %dlt_i=40/1000;
    %dlt_i=50/1000;
    %dlt_i=60/1000;
    %dlt_i=70/1000;
    %dlt_i=80/1000;
    %dlt_i=90/1000;
    %dlt_i=100/1000;
    %dlt_i=120/1000;
    d3=d2+2*dlt_i;

%Zrak
    Tv=23.3;               %[°C] temperatura zraka
    pa=101325;             %[Pa] atmosferski tlak
    v_z=2;                 %[m/s] brzina strujanja ztraka
%VARIJABLE
    n=200;                 % broj segmenata
du=d1;                    %[m] unutarnji promjer kompozicije cijev i
izolacija
dv=d3;                    %[m] vanjski promjer kompozicije cijev i
izolacija

    g=4*m/(pi*d1^2);       %[kg/(s*m^2)] masenifluks
    T_s=XSteam('Tsat_p',p_s); %[°C] temperatura zasićenja pare
    h_vk=XSteam('hL_p',p_s); %[kJ/kg] specifična entalpija vrele
kapljevine
    h_sz=XSteam('hV_p',p_s); %[kJ/kg] specifična entalpija suho zasićene
pare
```

```

mi_vk=XSteam('my_ph', p_s, h_vk);    %[Pa*s] dinamička viskoznost vrele
kapljevine
mi_sz=XSteam('my_ph', p_s, h_sz);    %[Pa*s] dinamička viskoznost
suhozasićene pare
lmd_vk=XSteam('tc_ph', p_s, h_vk);    %[W/(m°C)] toplinska vodljivost vrele
kapljevine
cp_vk=XSteam('CpL_p', p_s);          %[kJ/kg°C] specifični toplinski
kapacitet
rho_vk=XSteam('rhoL_p', p_s);         %[kg/m^3] gustoća vrele kapljevine
rho_sz=XSteam('rhoV_p', p_s);         %[kg/m^3] gustoća suhozasićene pare
Pr_vk=1000*cp_vk*mi_vk/lmd_vk;       %[nema dimeznija] Prandtlov broj za
vrele kapljevine

mi_z=1.983*10^(-5);                  %[Pa s] dinamička viskoznost zraka
R_z=287.058;                         %[J/(kg K)] specifična plinska
konstanta za zrak
ro_z=pa/(R_z*(Tv+273.15));           %[kg/m^3] gustoća zraka
lmd_z=0.024;                         %[W/(m K)] toplinska vodljivost zraka
cp_z=1005;                           %[J/kg K] specifični toplinski
kapacitet zraka
Pr_z=mi_z*cp_z/lmd_z;                % Prandtl broj za zrak
Re_z=v_z*dv*ro_z/mi_z;               %Reynoldsov broj za zrak
%racunanje koeficijenta prijelaza topline na vanjskoj stijenci

Nu_z=0.3+((0.62*(Re_z^(1/2))*(Pr_z^(1/3))/(1+(0.4/Pr_z)^(2/3)))^(1/4))*((1+
(Re_z/282000)^(5/8))^(4/5));
alf_2=Nu_z*lmd_z/dv;

lseg=L/n;                            %[m] duljina segmenta
%vseg=lseg*du*du*pi/4;
r_kon=(log(d2/d1))/lmd_c + (log(d3/d2))/lmd_i;    %[K/W] konstanta
u toplinskom toku
%r_kon=(log(d2/d1))/lmd_c ;

%RACUNANJE
h_1=h_sz-100;
x0=ones(1,n)*h_1;                    %pocetni uvjeti
h0=fsolve(@dva,x0);

%toplinski tok
q_uk=(h_sz-h0(n))*m*1000;             %[W]

```



**dva.m**

```

function F = dva(h0)
global m dvdu Tv g T_s h_vk h_sz mi_vklseg r_kon n lmd_vkPr_vk
global alf_2 rho_vkrho_sz
%Parametri za prvi segment

    %racunanje koeficijenta prijelaza topline na unutrašnjostijenci cijevi
    x(1)=(h0(1)-h_vk)/(h_sz-h_vk);
    if x(1)>=1
        alf_1=1000;
    else
        g_ekv=g*((1-x(1))+x(1)*sqrt(rho_vk/rho_sz));
        r_ekv(1)=g_ekv(1)*du/mi_vk;
        alf_1(1)=(lmd_vk/du)*0.0265*(r_ekv(1)^0.8)*Pr_vk^(1/3);
    end

    %toplinski tok
    ql(1)=lseg*2*pi*(T_s -
    Tv)/((1/((du/2)*alf_1(1)))+r_kon+(1/((dv/2)*alf_2)));
    qu(1)=ql(1)/1000;

%Parametri od drugog do n-tog segmenta
for ii=2:n

    %racunanje koeficijenta prijelaza topline na unutrašnjostijenci cijevi
    x(ii)=(h0(ii)-h_vk)/(h_sz-h_vk);
    if x(ii)>=1
        alf_1(ii)=1000;
    else
        g_ekv(ii)=g*((1-x(ii))+x(ii)*sqrt(rho_vk/rho_sz));
        r_ekv(ii)=g_ekv(ii)*du/mi_vk;
        alf_1(ii)=(lmd_vk/du)*0.0265*(r_ekv(ii)^0.8)*Pr_vk^(1/3);
    end

    %toplinski tok
    ql(ii)=lseg*2*pi*(T_s -
    Tv)/((1/((du/2)*alf_1(ii)))+r_kon+(1/((dv/2)*alf_2)));
    qu(ii)=ql(ii)/1000;

end

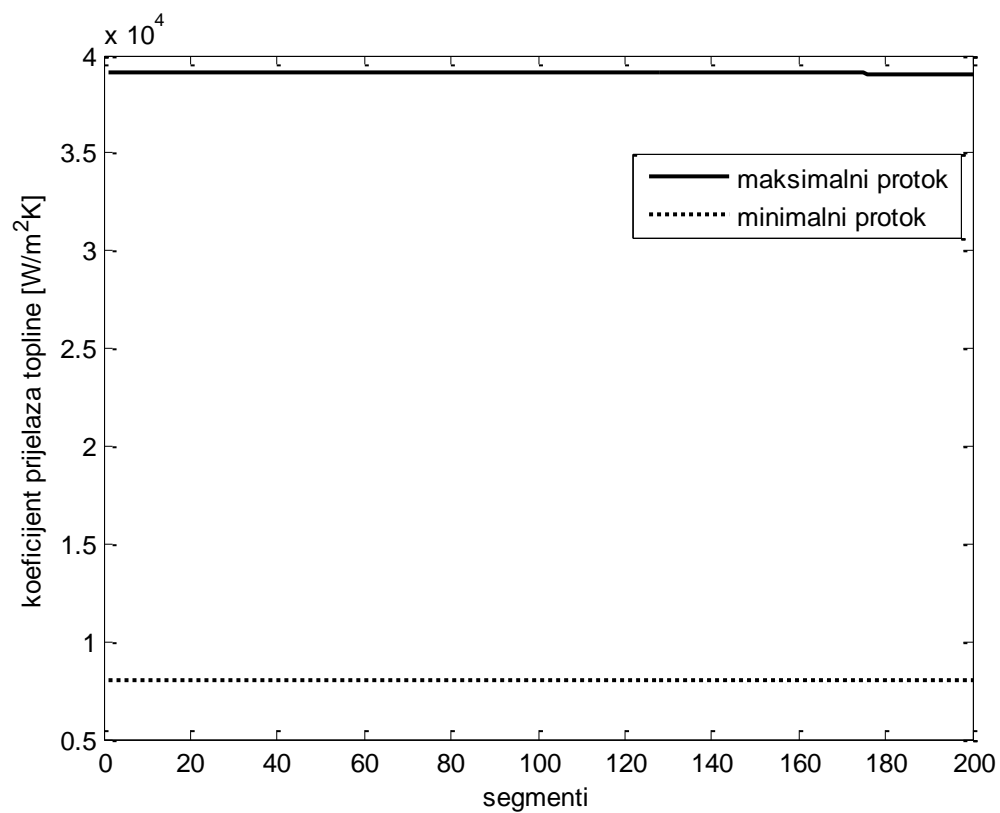
F(1)=h0(1)-h_sz+qu(1)/m;
for ii=2:n
    F(ii)=h0(ii)-h0(ii-1)+qu(ii)/m;
end

end

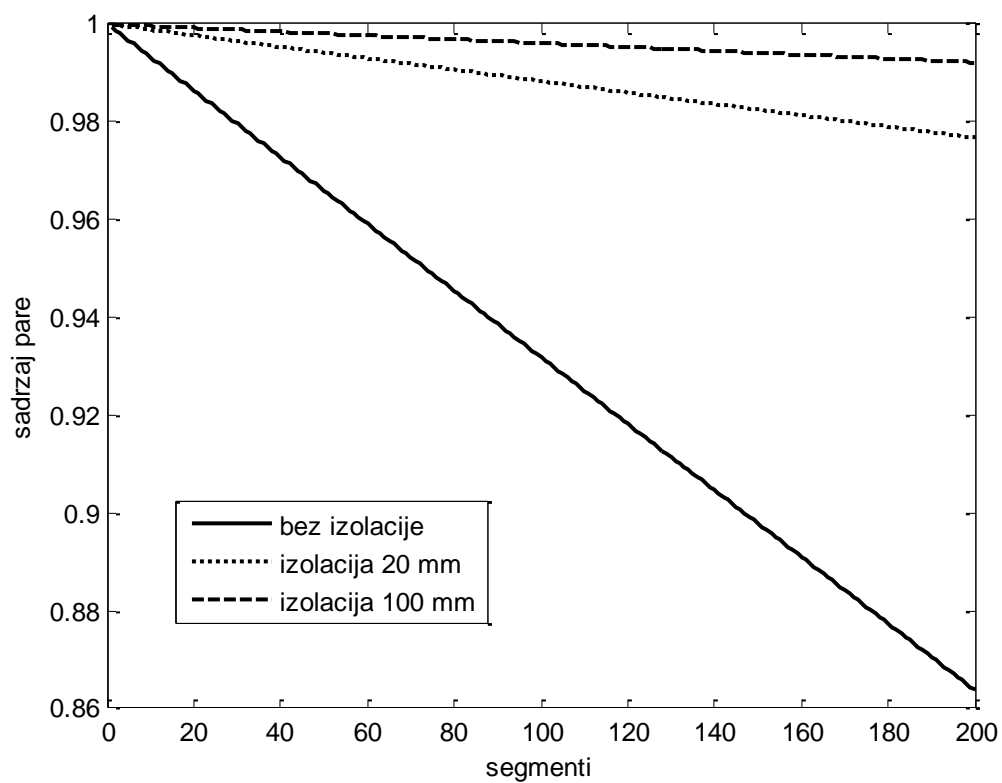
```

## Prilog II: Prikaz odabranih međurezultata po segmentima

Koeficijent prijelaza topline po segmentima pri maksimalnom i minimalnom protoku:



Promjena sadržaja pare po segmentima s primjenom različitih debljina izolacije A:



Temperatura na vanjskom rubu po segmentima s primjenom različitih debljina izolacije A:

$T_v=1.5$

